

Trabajo Fin de Grado

Modelado de un autobús eléctrico urbano y
optimización de la estrategia de carga

Modeling of an urban electric bus and
optimization of the charge strategy

Autor/es

Gonzalo Peña Salvador

Director/es

José Francisco Sanz Osorio

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2021

Resumen

Vivimos en tiempos de cambios, sobre todo con relación al medio ambiente. Cada vez son mayores las limitaciones impuestas a los vehículos de combustión, es por eso por lo que la dirección hacia la que apunta el ámbito automovilístico concierne en gran medida el vehículo eléctrico.

En este proyecto se busca modelizar un autobús eléctrico, empleando datos de trayectos de autobuses reales para obtener las variables que caracterizan al motor, batería y carga.

Se ha realizado un breve estudio sobre la historia del vehículo eléctrico e indagado sobre los comienzos de los autobuses eléctricos. También se ha buscado información sobre los diversos motores eléctricos que existen actualmente, de las baterías y de los sistemas de carga de oportunidad.

Mediante el programa Matlab/Simulink se ha realizado el modelado de un autobús eléctrico, con el cual, se han obtenido datos sobre la potencia y energía requerida para realizar un trayecto de la línea 41 de los autobuses de Zaragoza. Una vez con estos datos, se ha hecho un breve análisis del mercado de motores eléctricos y baterías con el que se ha llegado a la selección de un tipo concreto de ambos.

Por último, se ha realizado una comparativa entre el autobús de hidrógeno y el eléctrico, con el objetivo de encontrar las diferencias entre ambos y de obtener la mejor solución hoy en día.

Índice

Resumen.....	3
1. Introducción.....	6
2. Situación actual.....	6
2.1 Consumo de combustibles fósiles.....	7
2.2 Breve reseña del automóvil eléctrico.....	8
2.3 Autobuses eléctricos actuales.....	9
MAN NM 253-F.....	10
Volvo 7900 hybrid.....	10
Irizar ie bus 12.....	10
3. Modelo matemático.....	11
3.1 Fuerza de ascensión.....	13
3.2 Fuerza aerodinámica.....	13
3.3 Fuerza de rozamiento por rodadura.....	14
3.4 Fuerza de aceleración lineal.....	15
3.5 Fuerza de aceleración angular.....	15
3.6 Frenado regenerativo.....	15
4. Obtención de datos.....	16
4.1 Ruta de autobús.....	17
4.2 Herramientas para la toma de datos y consideraciones.....	18
4.3 Cálculos previos.....	18
Ángulo de la pendiente.....	18
4.4 Autobús utilizado.....	19
4.5 Datos tomados.....	20
5. Implementación del modelo en Matlab-Simulink.....	22
5.1 Zona de entrada de datos.....	23
5.2 Bloque de cálculo de fuerzas.....	24
5.3 Zona de salida de datos.....	25
6. Cálculos y resultados.....	25
7. Selección del motor.....	29
7.1 Tipos de motores.....	29
7.2 Selección de motor.....	30
8. Selección de la batería.....	30

8.1 Comparación de baterías.....	31
8.2 Cálculo de la batería.....	33
9. Métodos de carga.....	36
9.1 Carga por catenaria.....	37
9.2 Carga sin contacto.....	38
WPT de resonancia magnética.....	38
WPT capacitivos.....	38
Transferencia de potencia mediante microondas.....	39
WPT óptico.....	39
9.3 Cálculo del cargador.....	40
10. Autobús de hidrógeno.....	41
11. Conclusión.....	42
12. Bibliografía.....	43
Anexo A: Velocidad del viento en Zaragoza.....	47
Anexo B: Tabla de recogida de datos.....	48
Anexo C: Gráficos de datos tomados.....	48
Anexo D: Descripción y diagrama de flujo de fuerzas simuladas.....	51
Fuerza de rodadura (F_{roz}).....	51
Fuerza aerodinámica (F_{ae}).....	51
Fuerza de ascensión ($F_{ascensión}$).....	52
Fuerza aceleración lineal y freno regenerativo ($F_{ac.lineal}$).....	52
Fuerza de aceleración angular ($F_{ac.angular}$).....	53
Anexo E: Tipos de motores.....	53
Motor DC-Brushed.....	53
Motor de inducción.....	54
Motor de imanes permanentes.....	55
Motor de reluctancia conmutado.....	55
Anexo F: Clasificación de baterías.....	56
Baterías plomo-ácido.....	56
Baterías Ni-Cd.....	57
Baterías Níquel-Metal hidruro.....	58
Ion-litio.....	58
Baterías metal-aire.....	61

1. Introducción

El objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio técnico-económico comparando las actuales líneas de autobús urbano (línea 41 de Zaragoza) con unas posibles líneas de autobuses eléctricos. También se hará hincapié en las diversas formas de carga que pueden tener estos autobuses eléctricos con el fin de optimizar la carga.

Para cumplir este objetivo se van a obtener los datos de consumo de la línea 41 de autobuses de Zaragoza mediante un modelo cinemático y dinámico realizado en el programa MATLAB. Posteriormente se realizará un estudio de las diferentes formas de carga y la posible implantación de éstas en las vías públicas. Para llegar a este objetivo se va a realizar:

- Una revisión de la situación actual en la que se encuentran los autobuses convencionales, el impacto medioambiental que tienen, así como un estudio del arte de los diversos modelos de autobuses urbanos que se pueden ver hoy en día, concretamente en Zaragoza.
- Una descripción del modelo matemático que se va a emplear para realizar la simulación de los consumos y potencia de un autobús eléctrico.
- La implementación del modelo matemático al programa MATLAB del que se obtendrán los datos de consumo y potencia.
- Un breve estudio de los diferentes tipos de motores eléctricos que existen y una comparación entre ellos para la selección de un tipo concreto, una vez elegido el tipo, se realizará una búsqueda en catálogos para encontrar un motor que satisfaga las necesidades del autobús.
- Breve estudio de los diferentes tipos de baterías que hay en el mercado y que se pueden emplear para vehículos eléctricos, así como la selección del mejor tipo para el diseño de la batería de un autobús eléctrico. Tras esto, se calculará, dadas las necesidades de la línea de autobús, el tamaño de batería adecuado para la línea que se ha elegido.
- Estudio de los diversos métodos de carga existentes, comparación entre ellos y la selección del mejor de ellos.
- Comparativa del posible uso del autobús de hidrógeno en lugar del autobús eléctrico.

2. Situación actual

Según datos del *Ayuntamiento de Zaragoza*, el 2019 -año precedente a la pandemia por *COVID-19*, supuso para la ciudad de Zaragoza el año de mayor utilización del transporte público de los últimos diez años, con un total de más de 123 millones de viajeros. De ellos, más del 76,5% utilizaron el autobús urbano, demostrando que en ciudades del tamaño y de la disposición

topográfica de Zaragoza, el autobús continúa siendo un método válido de transporte urbano, incluso a pesar de la introducción del tranvía en el año 2011 [1].

Por otro lado, en diciembre de 2019, la Unión Europea publicó el Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*) [2], que pretende reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en, al menos, un 55% para 2030 y llegar a la neutralidad climática en 2050. Esto implica la progresiva eliminación de las fuentes de CO₂ como consecuencia del uso de combustibles de origen fósil. Es necesario mencionar, que los medios de transporte constituyen uno de los grandes contribuidores a la generación de CO₂. Concretamente, según la *Environmental Protection Agency* (EPA) de los Estados Unidos, el transporte constituyó el 29% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera en 2019 [3]. La particularidad de esta fuente de CO₂ es que además es dispersa, y por tanto difícil de atajar si no se trata en su origen.

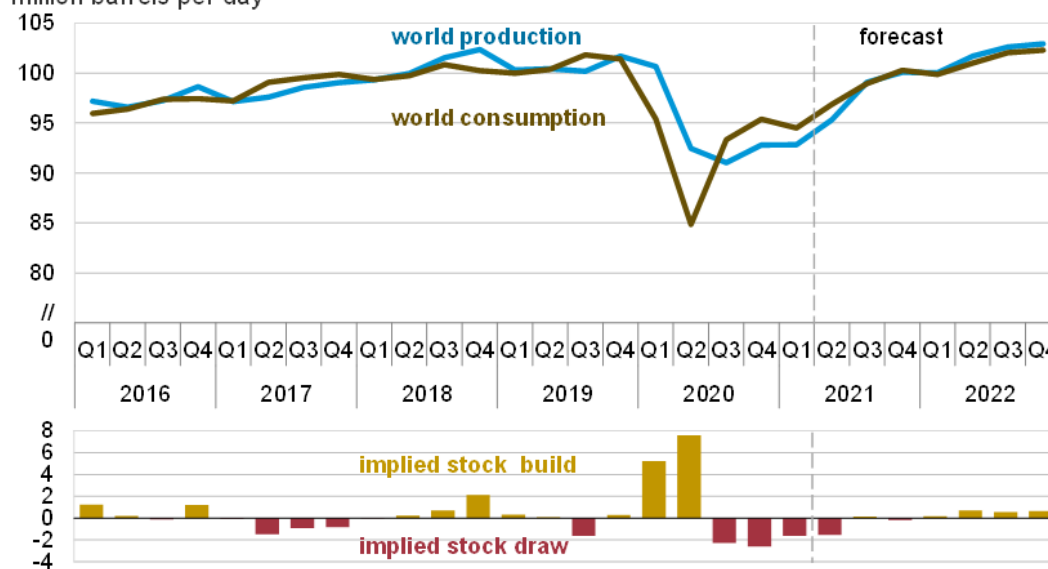
Con estas premisas, en este apartado se va a realizar un análisis de la situación actual en la que se encuentran las líneas de autobuses urbanos en la ciudad de Zaragoza, así como de un estudio del "estado de la técnica" de varios modelos de autobuses propulsados con motor de explosión, híbridos y eléctricos.

2.1 Consumo de combustibles fósiles

Desde la tercera década del siglo XX, los combustibles fósiles han sido un pilar fundamental de nuestra economía, sociedad y calidad de vida del mundo desarrollado. Pese a esto, los hidrocarburos constituyen un recurso no renovable, lo que indica que en algún momento dejara de haber existencias [4]. Es por esto, por lo que la mayoría de los países del mundo han empezado a volcarse en una carrera por la independencia de los combustibles fósiles.

World liquid fuels production and consumption balance

million barrels per day



Source: U.S. Energy Information Administration, Short-Term Energy Outlook, June 2021



Gráfico 2.1.-Producción y consumo de combustibles fósiles líquidos de los últimos cinco años. Fuente: [5]

Pese a esta presión medioambiental y la reducción de reservas, el consumo de combustibles fósiles solo ha disminuido debido a la pandemia causada por la COVID-19, tal y como lo muestra el Gráfico 2.1. El gráfico también nos muestra que ya se ha recuperado el consumo previo a la pandemia y estima que la demanda no parará de aumentar hasta el 2022.

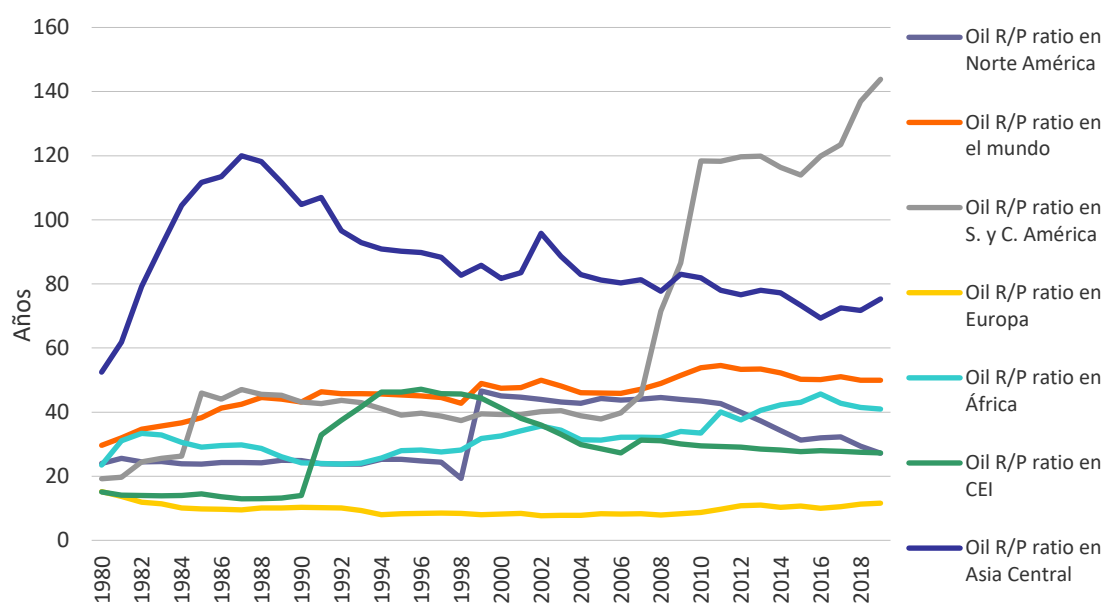


Gráfico 2.2.- Ratios reservas/producción a través de los años para distintas zonas del mundo. Fuente: [6]

Por otra parte, las reservas existentes en todo el mundo para cubrir la demanda actual, son de menos de 50 años según muestra el Gráfico 2.2 (curva naranja). Esto implica la necesidad de realizar cambios a nivel global para conseguir, por un lado, desprenderse de la dependencia del petróleo, y por otro, reducir la producción de gases causantes del efecto invernadero (CO₂ principalmente). Una de las formas más notables es mediante la introducción de vehículos eléctricos que sustituyan a los viejos vehículos de combustibles fósiles.

2.2 Breve reseña del automóvil eléctrico

Los comienzos del vehículo propulsado exclusivamente con electricidad comienzan a mediados del siglo XIX. Fue por estas fechas cuando el primer motor eléctrico fue creado por *Ányos Jedlik*. [7].

No fue hasta 1835, cuando se creó el primer coche eléctrico por *Sibrandus Stratingh* y *Christopher Becker*, el cual funcionaba mediante pilas alcalinas no recargables [8].

En 1859 surgieron las primeras baterías recargables de plomo-ácido inventadas por *Gaston Planté*. Gracias a la capacidad de ser recargadas conectándolas a la corriente eléctrica, estas baterías supusieron un gran impulso para el vehículo eléctrico [9].

A medida que pasaban los años la popularidad de este tipo de vehículos fue incrementando debido a su escaso ruido, no producían ningún tipo de gases y eran mucho más simples de manejar y de mantener. Con este tipo de características los coches eléctricos se vendieron sobre todo en ciudades, dado que su velocidad y su rango de autonomía era muy bajo para largos recorridos [8].

En cuanto a los autobuses eléctricos, aun tardaron en aparecer. Los primeros prototipos de este tipo de autobuses vieron la luz en 1898 por la empresa alemana *ABOAG* y, por las mismas fechas en España por la empresa de *Emilio de la Cuadra, Compañía General de Coches*. En ambos casos

los problemas eran los mismos, al tener un peso tan elevado, la potencia de las baterías de aquella época no era suficiente para mover una distancia razonable el autobús [10].

Uno de los primeros modelos funcionales del autobús eléctrico fue el *MAN 750 HO-M10 E*, diseñado por la empresa *MAN* en 1970. Este modelo podía transportar a 99 pasajeros a una velocidad máxima de 60 km/h, además contaba con una batería de 108 kWh situada en un remolque (Figura 2.1), que le dotaba de una autonomía de 50 km [11].

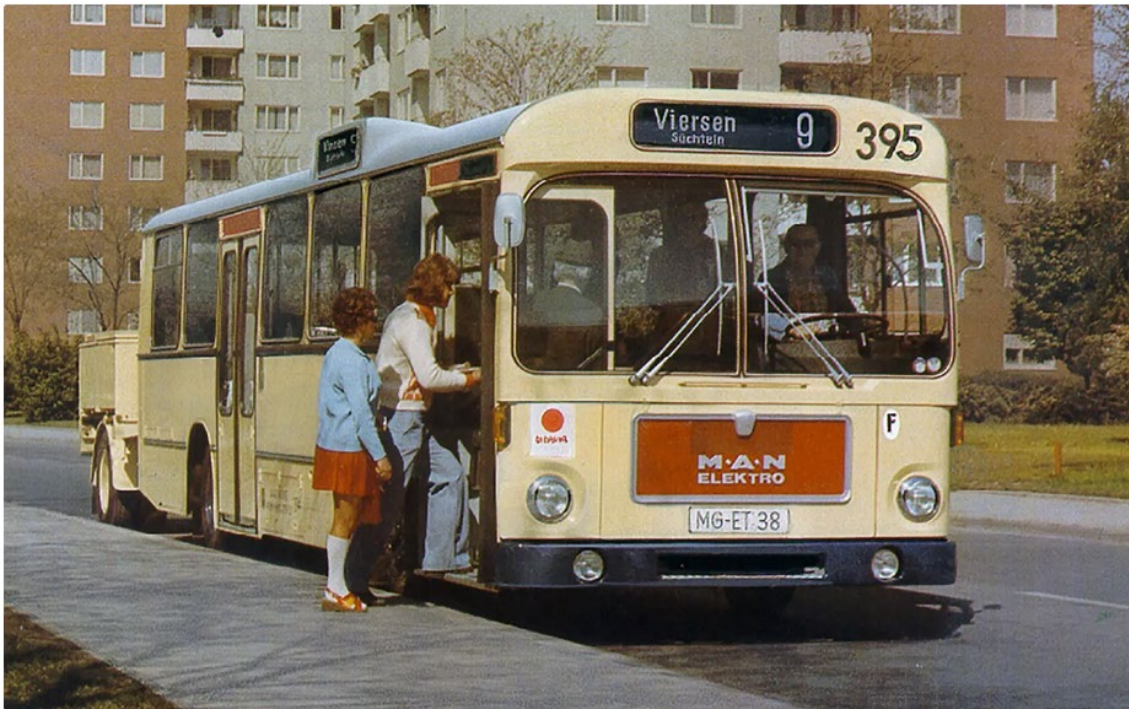


Figura 2.1.- MAN 750 HO-M10 E. Fuente: [11]

2.3 Autobuses eléctricos actuales

Dado que en este trabajo nos vamos a centrar en la ciudad de Zaragoza, se van a usar como autobuses actuales los 3 más recientes y usados por la empresa *Avanza Zaragoza*, que se encarga de todo el transporte público de la ciudad [12]. Cada uno de ellos dispone de un sistema de propulsión distinto, desde el diésel hasta el eléctrico pasando por el híbrido diésel-eléctrico. En la Tabla 2.1 se recogen los modelos y en la Tabla 2.2 las principales características de cada uno de ellos.

Tabla 2.1.- Modelos de autobús recientemente incorporados a la flota de Avanza Zaragoza. Fuente: Elaboración propia

Modelo	Características	Figura
MAN NM 253-F	<p>Fabricante: MAN</p> <p>Incorporado a la flota de Avanza Zaragoza en 2016.</p> <p>Propulsado por un motor diésel</p>	 <p>A blue MAN NM 253-F bus is shown at night with its headlights on. The destination sign above the windshield reads "Lion's City 2018". The MAN logo is visible on the front and side of the vehicle.</p>
Volvo 7900 hybrid	<p>Fabricante: Irizar</p> <p>Incorporado a la flota de Avanza Zaragoza en 2019.</p> <p>Propulsado por un motor híbrido diésel y eléctrico</p>	 <p>A light green Volvo 7900 hybrid bus is shown from a front-three-quarter view. The destination sign above the windshield reads "S-CHARGE". The Volvo logo is visible on the front grille.</p>
Irizar ie bus 12	<p>Fabricante: Irizar</p> <p>Incorporado a la flota de Avanza Zaragoza en 2019.</p> <p>Propulsado por un motor eléctrico</p>	 <p>A silver Irizar ie bus 12 is shown from a front-three-quarter view. The Irizar logo is visible on the front grille. The bus has a modern, aerodynamic design with large windows.</p>

Tal y como se puede ver en la Tabla 2.2, el modelo más pesado es el modelo eléctrico, ya que las baterías que este tiene que llevar son mucho más pesadas que el depósito de un motor convencional. También es el modelo más grande y de mayor capacidad lo que supone un peso añadido.

En cuanto a la potencia se puede destacar el modelo híbrido ya que cuenta con el motor de mayor potencia al cual hay que añadir la que es capaz de suministrar el motor eléctrico.

Por último, en cuanto al par, hay que señalar que el modelo eléctrico es el que mayor par tiene pese a no contar con la mayor potencia.

Tabla 2.2.- Características de autobuses recientes de Avanza Zaragoza. Fuente: [13]–[15]

Modelo	Potencia [kW]	Potencia eléctrica [kW]	Par [Nm]	Par eléctrico [Nm]	Nº de asientos*	Peso [kg]	Longitud [m]	Altura [m]
MAN NM 253-F	180	-	1000	-	22	19500	10,5	2,985
Volvo 7900 hybrid	240	120	918	800	27	19000	10,6	3,28
Irizar ie bus 12	-	180	-	1500	33	21200	12,16	3,30

*Dependiendo del modelo elegido y de la distribución seleccionada los números pueden cambiar

3. Modelo matemático

Para realizar la simulación del trayecto del autobús, hay que partir de un modelo matemático que refleje las condiciones físicas a las que está sujeto el autobús mientras realiza ese trayecto.

Las fuerzas que afectan directamente al movimiento del autobús y que condicionan su comportamiento a lo largo del recorrido son las mostradas en la Figura 3.1 y en la Tabla 3.1:

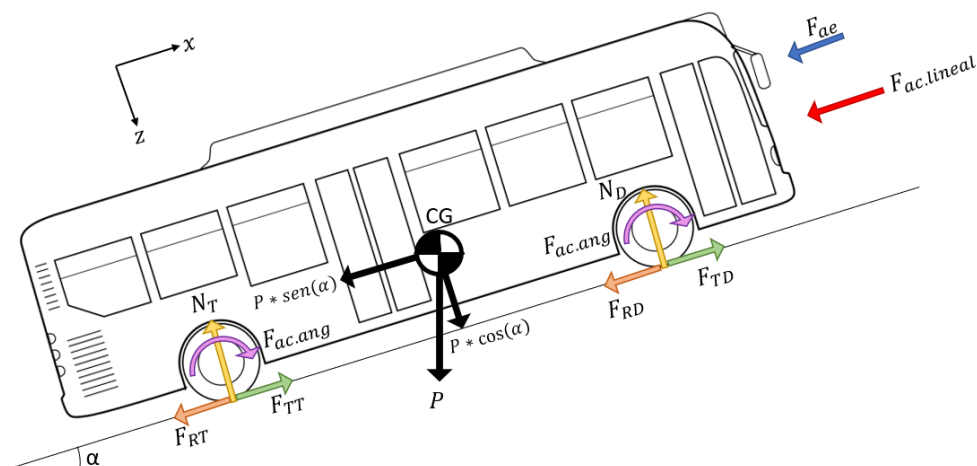


Figura 3.1.- Representación de fuerzas que actúan sobre un autobús. Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1.- Nomenclatura de la representación de fuerzas de la Figura 3.1

Nomenclatura	Fuerza	Dimensiones
F_{ae}	Fuerza aerodinámica	[N]
$F_{ac.lineal}$	Fuerza de aceleración lineal	[N]
$F_{ac.ang}$	Fuerza de aceleración angular	[N]
F_{TD}	Fuerza de tracción delantera	[N]
F_{TT}	Fuerza de tracción trasera	[N]
F_{RD}	Fuerza de rozamiento delantero	[N]
F_{RT}	Fuerza de rozamiento trasero	[N]
CG	Centro de gravedad del autobús	-
P	Peso	[N]
α	Pendiente de la carretera	°
N_D	Normal delantera	[N]
N_T	Normal trasera	[N]
a	Aceleración	[m/s ²]
m	Masa	[Kg]
FT_T	Fuerza total de tracción	[N]

El objetivo de este modelo, es obtener la fuerza de tracción total necesaria como suma del resto de fuerzas. Aplicando la segunda *ley de Newton* sobre el eje x y sobre el eje z el resultado es el que se muestra en las ecuaciones (ec. 3.1) a (ec. 3.3):

$$\sum F = m * a \quad (\text{ec. 3.1})$$

$$\text{Eje } x \rightarrow F_{TT} + F_{TD} - F_{RD} - F_{RT} - P * \text{sen}(\alpha) - F_{ae} - F_{ac.angular} = F_{ac.lineal} \quad (\text{ec. 3.2})$$

$$\text{Eje } z \rightarrow P * \text{cos}(\alpha) - N_T - N_D = 0 \quad (\text{ec. 3.3})$$

Partiendo de la (ec. 3.2), se despejan ambas fuerzas de tracción.

$$F_{TT} + F_{TD} = F_{ac.lineal} + F_{RD} + F_{RT} + P * \text{sen}(\alpha) + F_{ae} + F_{ac.angular} \quad (\text{ec. 3.4})$$

Reuniendo ambas fuerzas de tracción de la (ec. 3.4) como una sola, resulta:

$$FT_T = F_{ac.lineal} + F_{RD} + F_{RT} + P * \text{sen}(\alpha) + F_{ae} + F_{ac.angular} \quad (\text{ec. 3.5})$$

Se juntan los términos de rozamiento para compactar la formula y se denomina al termino $P * \text{sen}(\alpha)$ como fuerza de ascensión ($F_{ascension}$). Resultando la formula final como:

$$FT_T = F_{ac.lineal} + F_{RD} + F_{RT} + F_{ascension} + F_{ae} + F_{ac.angular} \quad (\text{ec. 3.6})$$

En adelante se van a ir definiendo cada término de la ecuación (ec. 3.6) para el caso concreto del autobús.

3.1 Fuerza de ascensión

Este término representa el esfuerzo que tiene que hacer el autobús para superar una pendiente, o al contrario, la fuerza que adquiere el autobús si este está bajando una pendiente. Se representa por la ecuación (ec. 3.7).

$$F_{ascensión} = P * \text{sen}(\alpha) \quad (\text{ec. 3.7})$$

Esta expresión consta de dos términos, el peso del propio (P) autobús y el seno del ángulo de la pendiente (α). Este último término es el que representa si esta fuerza ayuda al movimiento del autobús, o por el contrario lo lastra.

3.2 Fuerza aerodinámica

Con este término se representa la resistencia que ejerce el aire sobre un objeto al movimiento relativo del autobús y el gas (aire).

Para esta fuerza se parte de la ecuación de *Raylight* (ec. 3.8), cuyos términos se describen en la Tabla 3.2:

$$F_{ae} = f(R) * \rho * V^2 * S \quad (\text{ec. 3.8})$$

Tabla 3.2.- Nomenclatura de ecuación de Raylight

Nomenclatura	Variable
$f(R)$	Función del coeficiente de arrastre
ρ	Densidad del fluido
V	Velocidad relativa del objeto con el fluido en el que se encuentra
S	Superficie característica del objeto

Esta ecuación (ec. 3.8) tiene validez para objetos con una forma fija y para cuando el objeto sea incompresible y no viscoso [16].

Para el caso concreto del autobús, como la fuerza depende de una presión dinámica, la ecuación (ec. 3.8) se transforma en la (ec. 3.9):

$$F_{ae} = Cd * \frac{1}{2} * \rho * A * V^2 \quad (\text{ec. 3.9})$$

Lo único que se añade en la ecuación (ec. 3.9) es el termino de $\frac{1}{2}$ propio de la presión dinámica y se denomina el numero adimensional como, *coeficiente de arrastre* (Cd). Este coeficiente varía según la forma del objeto, la posición de este respecto al fluido, si existen efectos viscosos y si hay compresibilidad.

Según los estudios realizados en por *Bayindirli y Çelik* [17], el *coeficiente de arrastre* varía según el modelo de autobús utilizado. Además de la velocidad que tenga el autobús con respecto al aire en todo momento. Para simplificar se van a usar los datos obtenidos en el estudio anteriormente mencionado. El coeficiente de arrastre varía entre 0,583 y 0,654, en este caso, se utilizará el valor medio de estos dos valores.

Como la densidad del aire es un término que varía con la temperatura y la presión presente en el medio en ese momento, se va a determinar un valor constante para una temperatura de 15,6°C

[18], que es la temperatura promedio en Zaragoza a lo largo de todo un año. La presión se va a fijar en $101325 Pa$ y por lo tanto la densidad del aire en $1,225 kg/m^3$ [19].

En nuestro modelo sí que se va a incluir el efecto del viento el cual va ligado a la velocidad relativa de (ec. 3.9) dando como resultado la ecuación (ec 3.10).

$$F_{ae} = Cd * \frac{1}{2} * A * (V_{vehiculo} + V_{viento})^2 \quad (\text{ec. 3.10})$$

Debido a que en Zaragoza el viento suele tener una cierta intensidad, se va a tener en cuenta a la hora de simular el comportamiento del autobús. Se ha considerado que la velocidad media de Zaragoza durante todo el año es de $16,3 km/h$. Los valores mensuales pueden consultarse en el Anexo A. No se ha tenido en cuenta la dirección del viento dominante y se va a suponer que éste siempre está en contra del movimiento del autobús con el fin de que los resultados cubran la peor situación posible.

3.3 Fuerza de rozamiento por rodadura

Es una fuerza proveniente de la deformación de 2 cuerpos cuando uno rueda sobre otro. Esta fuerza actúa sobre el cuerpo rodante y en sentido contrario a la dirección del movimiento.

$$F_{roz} = P * Cr \quad (\text{ec. 3.11})$$

En la ecuación (ec. 3.11) se pueden distinguir 2 términos, el peso y el *coeficiente de rodadura* (Cr). El *coeficiente de rodadura* depende de factores como la naturaleza de las superficies de contacto, la composición de la rueda y de la carretera. Debido a la gran cantidad de factores que afectan este término, se puede simplificar para un rango de velocidades de uso normal del vehículo como indica *Guillespie* [20]:

$$Cr = (0,0041 + 0,000025 * V) * Ch \quad (\text{ec. 3.12})$$

En (ec. 3.12) se pueden diferenciar 2 términos, la V indicando la velocidad en km/h y Ch que es el *coeficiente de la superficie de rodadura*. La Tabla 3.3 muestra valores de Ch dependiendo del tipo de superficie sobre la que se mueve el vehículo.

Tabla 3.3.- Valores del coeficiente de la superficie de rodadura Ch Datos: *Fundamentals of vehicle dynamics*. Ecuación (4-16a) [20]

Superficie	Ch [adim]
Hormigón liso	1
Hormigón templado, ladrillo y asfalto frío	1,2
Asfalto caliente	1,5

Debido a que el estudio se está realizando para obtener la medida más restrictiva y a que el vehículo está circulando por la ciudad se va a tomar el valor de 1,5 para Ch .

3.4 Fuerza de aceleración lineal

La fuerza de aceleración lineal es la que depende de la aceleración lineal que lleve el vehículo.

$$F_{ac.lineal} = m * aceleración \quad (ec. 3.13)$$

La aceleración viene determinada por la variación de la velocidad del vehículo con respecto al tiempo.

$$aceleración = \frac{dV}{dt} \quad (ec. 3.14)$$

Los cálculos de esta fuerza se van a implementar en la simulación, realizada con el programa *Matlab/Simulink*, mediante incrementos de velocidad y de tiempo.

3.5 Fuerza de aceleración angular

Esta fuerza es la que engloba a todo el conjunto de masas giratorias que se encuentran en movimiento, así como la relación de velocidades motor rueda y al radio de la rueda del vehículo.

$$F_{ac.angular} = \frac{I * a * G^2}{r^2} \quad (ec. 3.15)$$

La ecuación (ec. 3.15) viene formada por I , el momento de inercia de las masas giratorias, G la relación de velocidades existente entre el motor y las ruedas, r el radio de rueda y a es la aceleración lineal.

Debido a que para calcular estos términos hace falta conocer a fondo la mecánica del vehículo, se realiza una aproximación que considera la fuerza de aceleración angular un 5% de la fuerza de aceleración lineal [21]. De este modo, la fuerza de aceleración angular queda descrita por la (ec. 3.16).

$$F_{ac.angular} = 0.05 * F_{ac.lineal} \quad (ec. 3.16)$$

3.6 Frenado regenerativo

El frenado regenerativo es un sistema de recuperación de energía cinética, la cual está presente en el movimiento del coche cuando este frena. Esta energía se almacena y puede ser utilizada más adelante.

Hay 2 tipos de frenado regenerativo: los que guardan la energía en una batería y los que almacenan la energía en volantes de inercia. Para el caso de los coches eléctricos se usa el primer tipo debido a la gran cantidad de baterías que poseen [22].

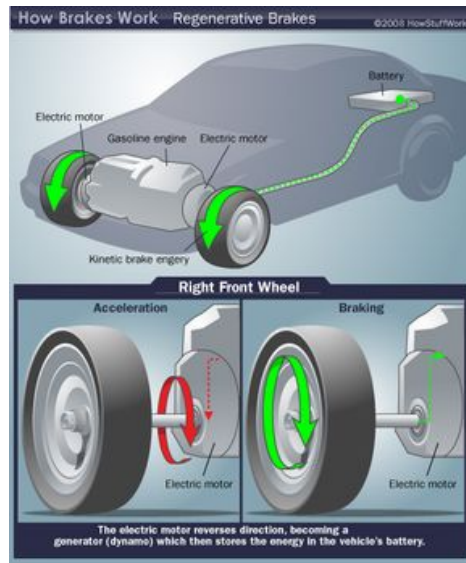


Figura 3.2.- Funcionamiento de frenado regenerativo Fuente:HowStuffWorks © 2008 [23]

En el caso de los coches eléctricos, para conseguir aprovechar esa energía cinética se usa el motor eléctrico del coche como generador. Esto se consigue haciendo que cuando el coche está frenando, las baterías paran de suministrar energía al motor y éste pasa a ser girado por el movimiento de las ruedas. De esta forma pasa de ser un motor a un generador de corriente eléctrica (Figura 3.2). Posteriormente esa electricidad generada pasa por un rectificador que realiza una correcta carga de batería.

Generalmente el par de frenado generado por el frenado regenerativo no puede suministrar la cantidad de par necesario para frenar el coche correctamente, por lo que requiere de frenos hidráulicos que restan eficiencia al conjunto, al no ser capaz de aprovechar toda la energía de frenado.

Además, el frenado regenerativo no se puede usar en varias situaciones como, por ejemplo, cuando el *estado de carga de la batería* (SOC) es elevado o la temperatura de la batería es muy elevada. Es para estos casos cuando se requiere un sistema de frenos hidráulico que sea capaz de frenar correctamente.

La eficiencia de este frenado puede llegar a alcanzar el 70% en los mejores casos. Para esta simulación, se optará por un rendimiento del 55% para dejar margen en caso de que el freno real tenga un peor rendimiento del freno regenerativo [23], [24].

4. Obtención de datos

En este capítulo se va a explicar el método de obtención de los datos empleados para la simulación del autobús. Se describirá el recorrido efectuado, así como el tratamiento matemático efectuado sobre los datos con el objetivo de determinar parámetros relevantes que se puedan incluir en el modelo matemático de simulación del autobús.

4.1 Ruta de autobús

La ruta de autobús elegida para este estudio es la línea 41 del transporte urbano de Zaragoza. Esta ruta comienza en el hospital Viamed de Montecanal y termina en la puerta del Carmen. Las Figuras 4.1 y 4.2 describen el recorrido completo en ambos sentidos. Cada uno de los puntos se identifica con una parada del autobús.

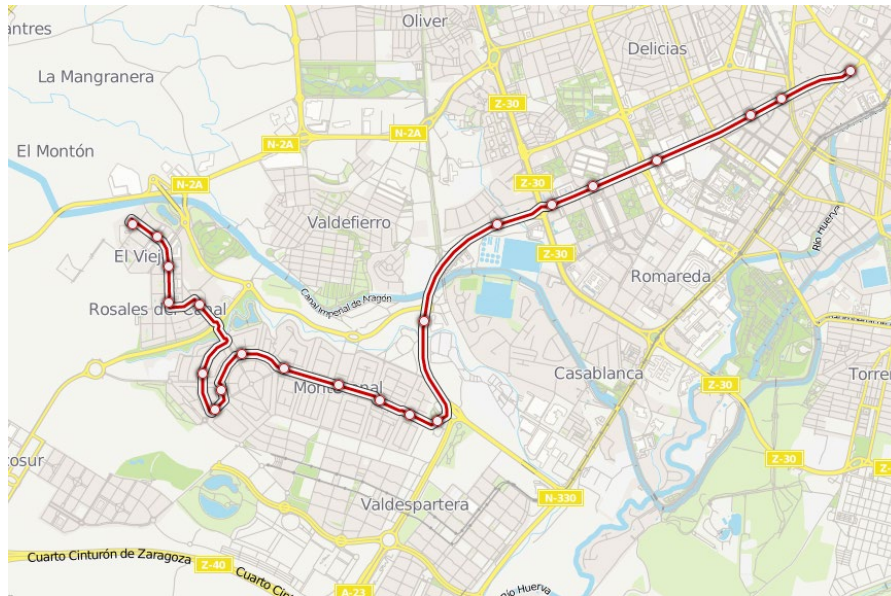


Figura 4.1.- Ruta línea 41 desde Puerta del Carmen a hospital de Montecanal Fuente: Avanza Zaragoza [25]

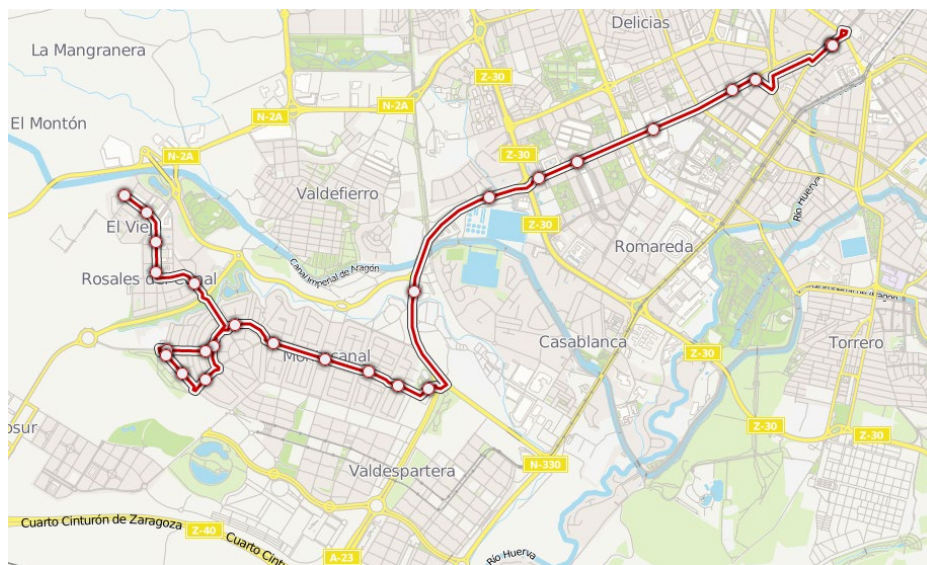


Figura 4.2.- Ruta línea 41 desde hospital de Montecanal a Puerta del Carmen Fuente: Avanza Zaragoza [25]

Esta ruta realiza el recorrido desde las 6:00 hasta las 23:00 con un tiempo de paso de 15-20 minutos según hora y día. La distancia recorrida también se ve modificada por la variación del sentido de la ruta a tomar, siendo de 8,8 km desde la Puerta del Carmen hasta el Hospital Viamed y 9,3 desde el Hospital hasta la Puerta del Carmen [25].

4.2 Herramientas para la toma de datos y consideraciones

Para la obtención de datos se ha usado una aplicación de geolocalización llamada *Geo Tracker* (gratuita, descargable en *Google Play Store*). Esta aplicación permite hacer una grabación de un recorrido registrando en tiempo real, datos de altura, velocidad, latitud y longitud. Esta aplicación y todas sus similares están pensadas para realizar actividades deportivas, por lo que, al utilizarla para obtener datos de un vehículo en movimiento, los datos obtenidos tienen cierta incertidumbre, por lo que es necesario tratarlos para que sean coherentes con la realidad.

Una vez realizada la grabación de la ruta, ésta se guarda en la aplicación y se puede exportar como archivo *gpx*. Una vez exportado, mediante el *convertidor de archivos gpx a datos excel* [26] se obtiene una tabla de datos que se puede copiar e insertar en Excel para la realización de gráficas comparativas. Las variables principales almacenadas son:

- Latitud [°]
- Longitud [°]
- Distancia recorrida [m]
- Tiempo [hh:mm:ss]
- Elevación [m]
- Velocidad [km/h]

En el Anexo B se muestra un ejemplo de la tabla de los datos registrados.

Respecto a la falta de precisión anteriormente aludida, se ha comprobado que la velocidad en las paradas del recorrido no terminaba de llegar a 0, por lo que toda velocidad que estuviera por debajo de 3 km/h se ha considerado equivalente a 0. En cuanto a las velocidades superiores, todas aquellas que superan los 56 km/h serán redondeadas a 56 km/h.

Otro factor que se ha visto entorpecido por el muestreo del programa es la elevación. Según la normativa del *Ministerio de Fomento* sobre la pendiente de las carreteras, la pendiente máxima permitida para una velocidad de 50 o 40 km/h es de 7% de inclinación y en casos excepcionales de 10% [27]. Debido a que el recorrido realizado no tiene ninguna pendiente excepcionalmente inclinada se escogerá como límite de inclinación el 7% de pendiente que equivale a $\pm 4^\circ$.

Por último, para asegurar que los datos mostrados tienen sentido, se calculará la aceleración en cada momento. De esta forma toda aceleración que sea superior a $2,1 \text{ m/s}^2$ e inferior a $-2,1 \text{ m/s}^2$ será modificada para entrar en estos márgenes, evitando así un requerimiento de potencia y par desmesurado.

4.3 Cálculos previos

Debido a que el archivo Excel generado no tiene todos los datos que se necesitan para la aplicación del modelo descrito en el capítulo 3 de esta Memoria, será necesario calcular varios términos adicionales como los que se describen a continuación.

Ángulo de la pendiente

La simulación va a tener en cuenta la pendiente por la que transcurre el recorrido, pero este dato no se nos proporciona directamente. Se parte de los datos de la altura y de la distancia recorrida por tramos.

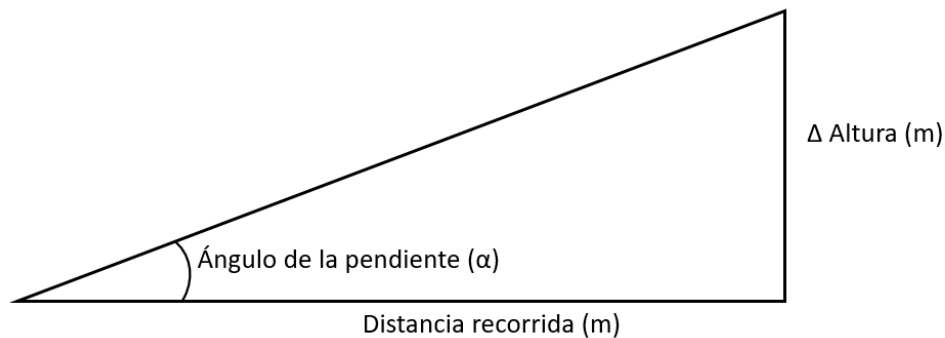


Figura 4.3.- Representación del ángulo de la pendiente. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se ve en la Figura 4.3, el ángulo de la pendiente se puede calcular a partir de los datos de la distancia recorrida y de la variación de la altura en cada momento del recorrido. Con estos dos valores se forma un triángulo rectángulo con el que se puede calcular el ángulo de la pendiente mediante la (ec. 4.1):

$$tg(\alpha) = \frac{\Delta altura}{Distancia\ recorrida} \quad (ec.4.1)$$

Y despejando el ángulo (ec. 4.2), será la expresión usada para calcular el ángulo de la pendiente a lo largo del recorrido.

$$\alpha = arctg\left(\frac{\Delta altura}{Distancia\ recorrida}\right) \quad (ec. 4.2)$$

4.4 Autobús utilizado

Para este estudio se va a emplear como modelo de autobús el Irizar ie bus 12 (Figura 4.4).



Figura 4.4.- Irizar ie bus 12. Fuente: [14]

Las características de dicho modelo, relevantes para llevar a cabo los cálculos de la simulación posterior se describen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1.-Características del autobús Irizar ie bus 12Fuente: Irizar [14]

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
<i>Longitud [m]</i>	12,16
<i>Altura máxima [m]</i>	3,3
<i>Anchura [m]</i>	2,55
<i>Área de contacto frontal [m²]</i>	8,415
<i>Batalla [m]</i>	5,955
<i>Peso [kg]</i>	21200
<i>Climatización del conductor [kW]</i>	Frío 3,5 – calor 13
<i>Climatización pasajeros [kW]</i>	Frío 28 – calor 32

4.5 Datos tomados

Los datos de la ruta (Línea 41) se tomaron durante el mes de julio de 2021. Se seleccionó un único trayecto (IDA y VUELTA) para tres momentos de la jornada, representando a tres condiciones de tráfico distintas en el entorno urbano:

- Trayecto 1.IDA: comienzo a las 9:48, hora de baja prioridad.
- Trayecto 1.VUELTA: comienzo a las 10:19.
- Trayecto 2.IDA: comienzo a las 10:53, hora de media prioridad.
- Trayecto 2.VUELTA: comienzo a las 11:19.
- Trayecto 3.IDA: comienzo a las 11:57, hora de alta prioridad.
- Trayecto 3.VUELTA: comienzo a las 12:24.

Los gráficos adjuntos en el Anexo C muestran los valores de la velocidad y tiempo del trayecto de IDA (Gráfico C.1) y de VUELTA (Gráfico C.2).

En los gráficos del Anexo C de velocidad se pueden ver claramente una serie de zonas diferenciadas. En el recorrido de IDA (Gráfico C.1), hay una primera zona (desde el segundo 0 hasta los 600 s) en la cual el autobús circula por la Puerta del Carmen, avenida Valencia, San Juan Bosco y Gomez Laguna. Por esta zona hay muchos semáforos, pero es muy recta y, como se puede ver en el gráfico abundan los acelerones y frenazos. La zona central (desde los 600 hasta los 1100 s) que corresponde con la avenida Alcalde Gómez Laguna, en la que al ser una vía principal y estar los semáforos sincronizados, permite alcanzar mayores velocidades, la promedio ronda los 50 km/h, y por último, una tercera zona (desde 1100 hasta los 1500-1600 s) que corresponde a la zona de Montecanal. En esta zona hay una gran cantidad de rotondas y giros que impiden mantener una velocidad constante y generan una zona de altibajos en la velocidad.

En el recorrido de VUELTA (Gráfico C.2) la situación es similar, existen 3 zonas de velocidades. La primera (desde 0 hasta 700 s) en este caso correspondiente a la zona de Montecanal, en la que nuevamente las velocidades tienen mucha variación debido a las rotondas y giros. Una zona central, (desde los 700 s hasta los 1200 s) correspondiente a la zona de la Avenida de Gomez Laguna, donde se alcanzan mayores velocidades por la escasez de paradas y rectitud. La última etapa (desde 1200 hasta 1800 s), coincide con la zona más céntrica de Zaragoza por la que pasa la línea y el autobús callejea haciendo que esta zona tenga unos picos muy abruptos y variaciones frecuentes en la velocidad. Además, también se puede ver que los recorridos de VUELTA (Gráfico C.2) son más largos que los de IDA (Gráfico C.1).

En cuanto a las gráficas de alturas, como se ha comentado anteriormente, este tipo de aplicaciones están pensadas para realizar un muestreo haciendo deporte. Debido a esto, las alturas son bastante dispares entre ellas, teniendo una diferencia de varios metros entre unas trayectorias y otras. En todo caso, se constata que tanto los recorridos de IDA como los de VUELTA son considerablemente planos, observándose las mayores diferencias en las zonas de Avda. Alcalde Gómez Laguna y Montecanal tanto en los trayectos de IDA (Gráfico 4.1) como de VUELTA (Gráfico 4.2).

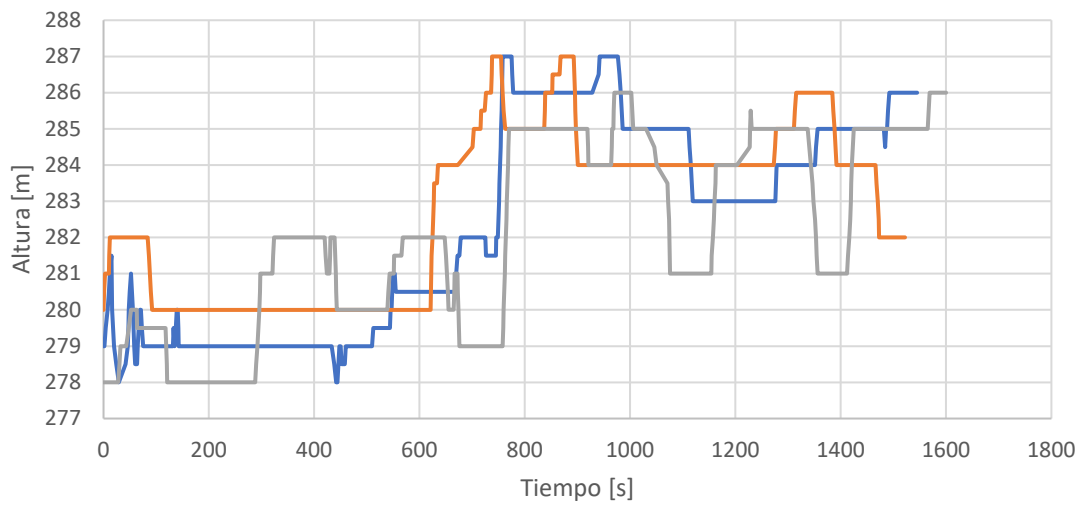


Gráfico 4.1.- Altura vs tiempo de diversas trayectorias de ida de la ruta 41. Fuente: Elaboración propia

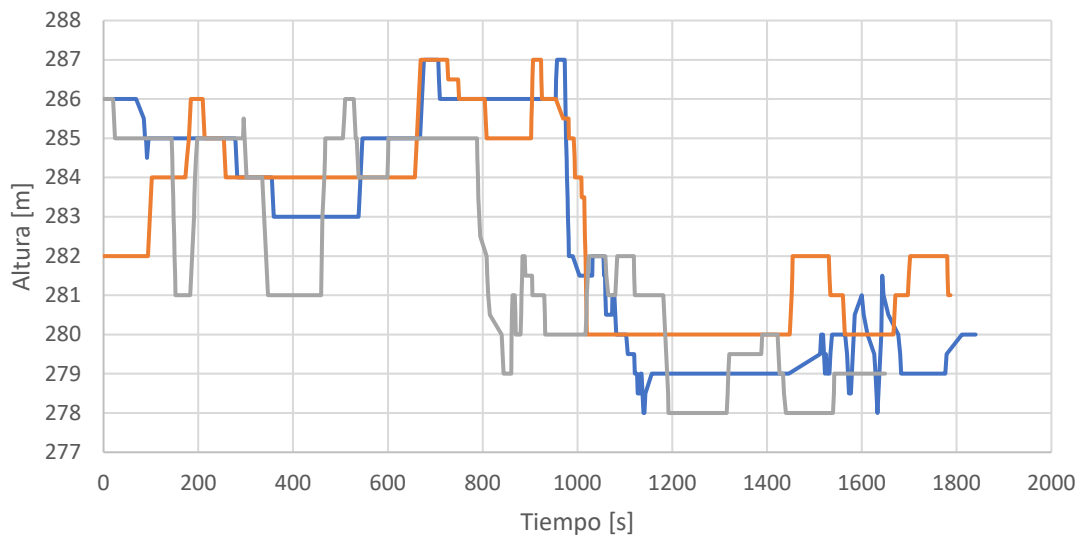


Gráfico 4.2.- Altura vs tiempo de diversas trayectorias de vuelta de la ruta 41. Fuente: Elaboración propia

5. Implementación del modelo en Matlab-Simulink

El programa empleado para la realización de la simulación del consumo del autobús eléctrico ha sido confeccionado en Matlab con la extensión Simulink.

Para la simulación se ha escogido los valores de las constantes que se recogen en la Tabla 5.1, que serán utilizados mediante un fichero de datos.

Tabla 5.1.- Valores de las constantes utilizadas en la simulación. Valores extraídos de los apartados 3.2, 3.3, 3.6 y tablas 3.3 y 4.1.

Nomenclatura	Nombre	Valor
da	Densidad del aire [kg/m^2]	1,225
M	Masa del autobús [kg]	21200
r	Radio de rueda [m]	0,478
$C1$	Constante para coeficiente de rodadura 1 [adim]	0,0041
$C2$	Constante para coeficiente de rodadura 2 [s/m]	0,000025
Ch	Coficiente de superficie de rodadura [adim]	1,2
A	Área de contacto frontal [m^2]	8,18
Cd	Coficiente aerodinámico de un autobús [adim]	0,6185
g	Aceleración de la gravedad [m/s^2]	9,8
V_{wind}	Velocidad del viento [km/h]	16,3

El programa de simulación, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 5.1, consta de 3 partes. La primera, está dedicada a la introducción de datos y al acondicionamiento de las unidades coherentes con los cálculos que se desarrollarán a posteriori. El segundo bloque, consiste en el cálculo de la fuerza total de tracción necesaria para hacer que el autobús se mueva según las condiciones impuestas. Por último, en el tercer bloque a partir de la fuerza obtenida y de la velocidad se calculan las variables necesarias para el diseño de la batería y del motor.

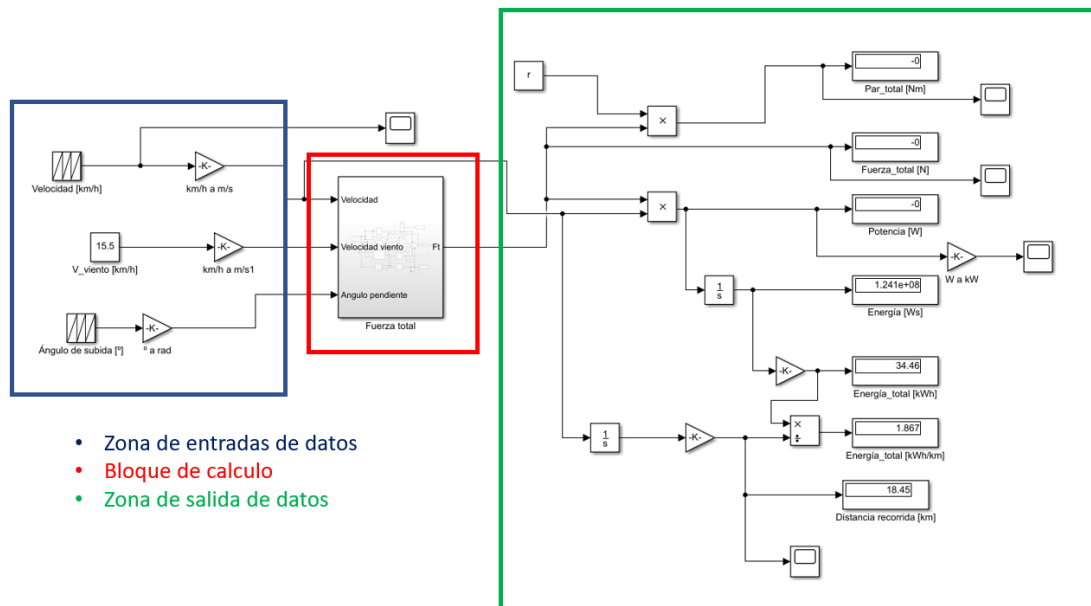


Figura 5.1.- Diagrama de flujo del programa de simulación. Se enmarcan las tres partes principales. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen cada uno de los elementos principales del programa, junto con su función y los resultados que se obtienen mediante su ejecución.

5.1 Zona de entrada de datos

Este es el bloque donde se introducen los datos para su posterior tratamiento. La Figura 5.2 describe en detalle el diagrama de flujo correspondiente.

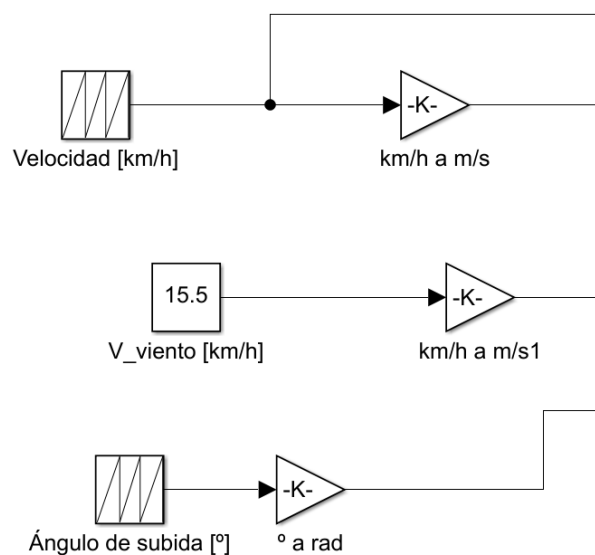


Figura 5.2.- Detalle del bloque de introducción de datos

La entrada de datos consta de 3 bloques principales:

- La entrada de velocidad: Es un bloque de secuencia en el cual se introducen los valores de la velocidad y el tiempo al que corresponde esa velocidad. Dado que la velocidad se introduce en [km/h], y que los cálculos necesarios requieren unidades del Sistema Internacional [m/s], se utiliza una ganancia para el cambio de unidades.
- La velocidad del viento: Este parámetro se ha considerado constante. Afectará negativamente al movimiento del autobús. Al igual que la velocidad del autobús, la velocidad del viento se introduce en [km/h]. Las unidades serán transformadas a [m/s] mediante una instrucción de ganancia.
- Pendiente (ángulo) de subida/bajada: Similar al bloque de la velocidad, pero sustituyendo la velocidad por el ángulo de la pendiente. De forma similar a los casos anteriores, con la salvedad de que en este caso hay que cambiar de grados a radianes.

5.2 Bloque de cálculo de fuerzas

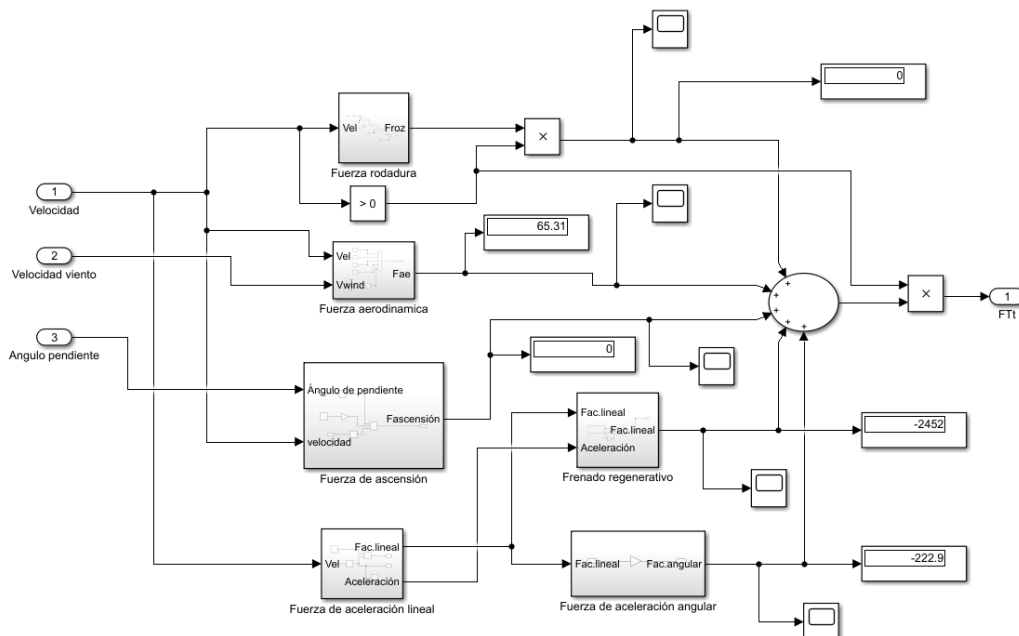


Figura 5.3.- Detalle del bloque de cálculo

En este bloque (Figura 5.3) es donde se operan todas las fuerzas que se han descrito en el apartado 4 de esta Memoria. Este bloque cuenta a su vez con un conjunto de sub-bloques, cada uno con la fuerza que calculan.

Cada una de las fuerzas (rodadura, aerodinámica, de ascensión y aceleración lineal), dispone de su propio sub-bloque que permite su cálculo a partir de los parámetros de entrada (velocidad, velocidad del viento y ángulo de la pendiente). También se han añadido medidores e indicadores para poder hacer un seguimiento de las fuerzas a lo largo de la simulación.

La descripción del cálculo de cada una de las fuerzas, así como el diagrama de flujo utilizado se puede visualizar en el Anexo D.

5.3 Zona de salida de datos

En esta zona (Figura 5.4) es donde se terminan de procesar los datos y se muestran los resultados finales.

Se parte de las variables velocidad (V) y fuerza total necesaria de tracción (FT_T). Con estas dos variables se calcula el par en rueda (Par_total), multiplicando la fuerza de tracción (FT_T) por el radio de rueda. También se muestra la potencia requerida ($Potencia$), la cual se obtiene multiplicando la fuerza de tracción y la velocidad en cada momento. La energía, ($Energía_total$) se obtiene integrando la potencia con respecto al tiempo y multiplicando por una ganancia para cambiar las unidades de ésta. La distancia recorrida ($Distancia_recorrida$) por el autobús, se obtiene integrando la velocidad con respecto al tiempo. Por último, el consumo se obtiene dividiendo la energía total ($Energía_total$) y la distancia recorrida ($Distancia_recorrida$).

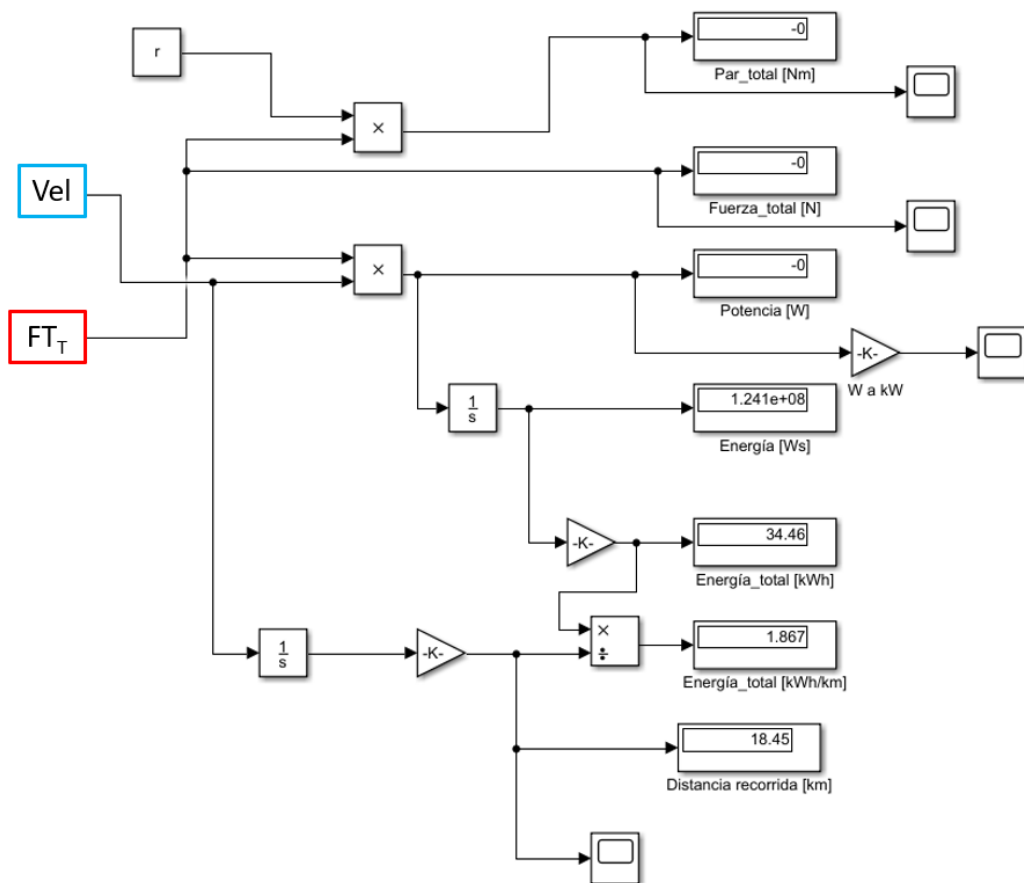


Figura 5.4.- Detalle del bloque de salida de datos

6. Cálculos y resultados

Para este capítulo se van a comentar todos los casos que se han analizado, así como los elementos requeridos para los posteriores cálculos como la elección de motor, batería y cargador del vehículo eléctrico.

Los Gráfico 6.1 y 6.2 muestran los resultados del cálculo, de la potencia instantánea requerida para realizar los trayectos, obtenida mediante el programa descrito en el capítulo 5. La potencia negativa mostrada en ambos gráficos indica la potencia de frenada que hay que realizar. Es en estas situaciones de potencia negativa cuando el frenado regenerativo actúa y recupera parte de la energía utilizada. En ambos gráficos se puede ver como la potencia instantánea más elevada ronda los 160 [kW]. También se puede apreciar algún pico de potencia negativa (de frenada) que equivale a momentos en los que el conductor tuvo que realizar una frenada brusca cuesta abajo. Se puede observar también que en los trayectos de la misma dirección las potencias instantáneas tienen una forma similar, pese a haberlos tomado a diferentes horas del día, y por tanto con tráfico denso, moderado y ligero.

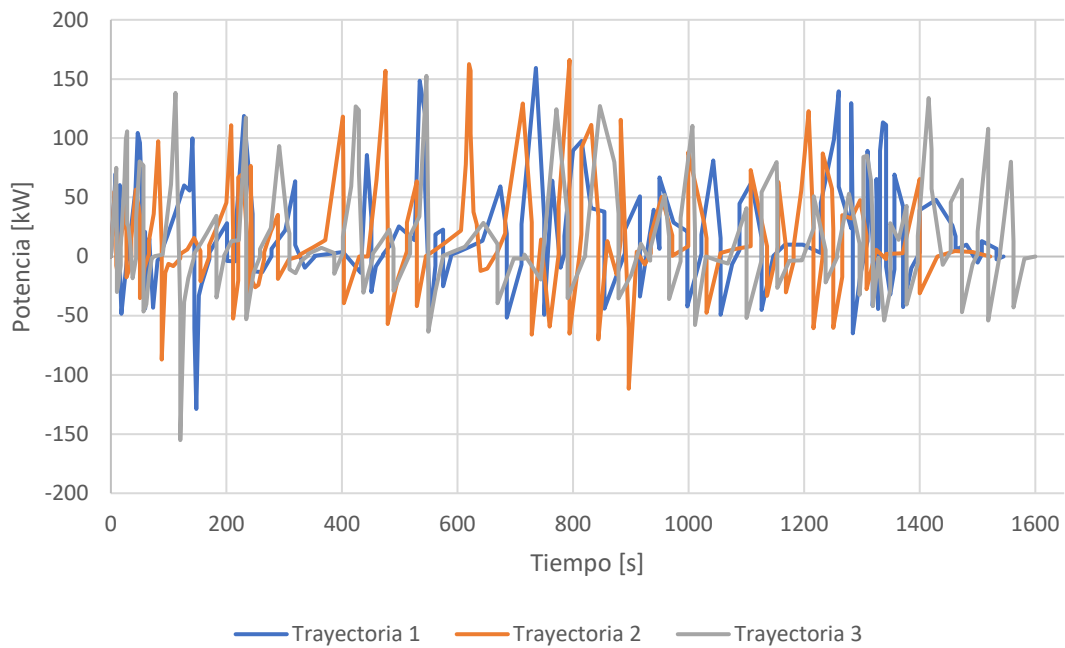


Gráfico 6.1.-Potencia instantánea requerida en función del tiempo para el trayecto desde puerta del Carmen a Montecanal (IDA)

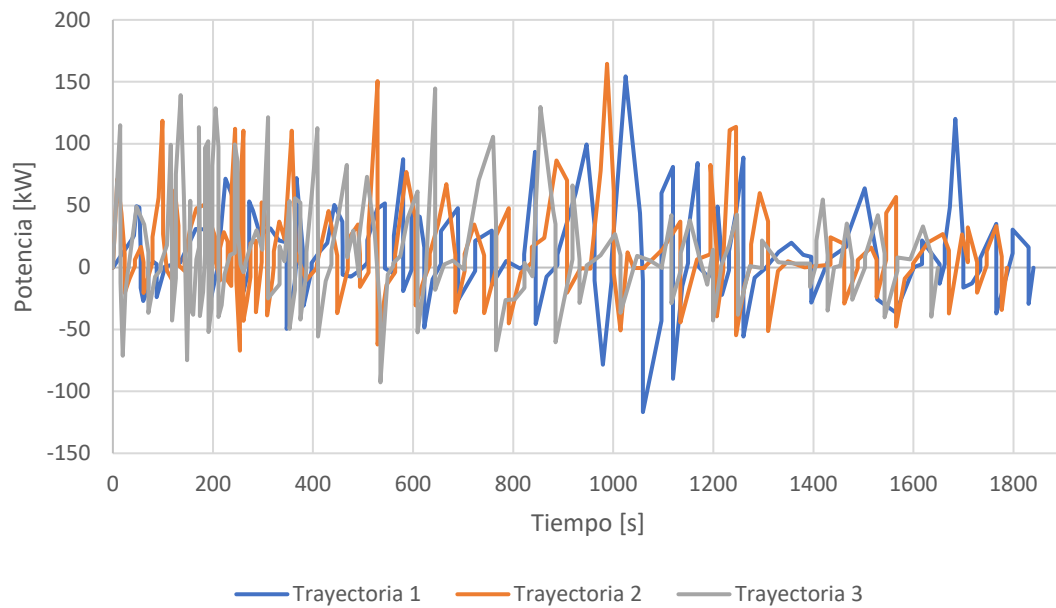


Gráfico 2.2.- Potencia instantánea requerida en función del tiempo para el trayecto desde Montecanal a puerta del Carmen (VUELTA)

En los Gráficos 6.3 y 6.4 se muestra el desarrollo del par en rueda necesario para cumplir con las necesidades de velocidad a lo largo del trayecto. Para convertir el par en rueda a par motor hay que utilizar una relación de transmisión que es la que se encarga de trasladar el par motor a las ruedas. Tanto para la ida como para la vuelta el par en rueda está contenido en ± 7000 [Nm]. Al igual que sucedía con la potencia, cuando el par es negativo indica que se está frenando y por tanto regenerando energía. Para que un motor pueda aportar el par requerido se necesitaría una relación de transmisión de como mínimo 5:1, de esta forma el par que tendría que aportar el motor sería de 1400 [Nm]. De esta forma dependiendo del motor a utilizar, se buscaría una relación de transmisión que se adecuara más a el par máximo que es capaz de aportar el motor.

En cuanto a los Gráficos 6.3 y 6.4 comentar que los trayectos realizados en la misma dirección tienen un aspecto similar. Sin embargo, se puede apreciar como en el Gráfico 6.4 hay una mayor variación del par en rueda, sobre todo hasta el segundo 400.

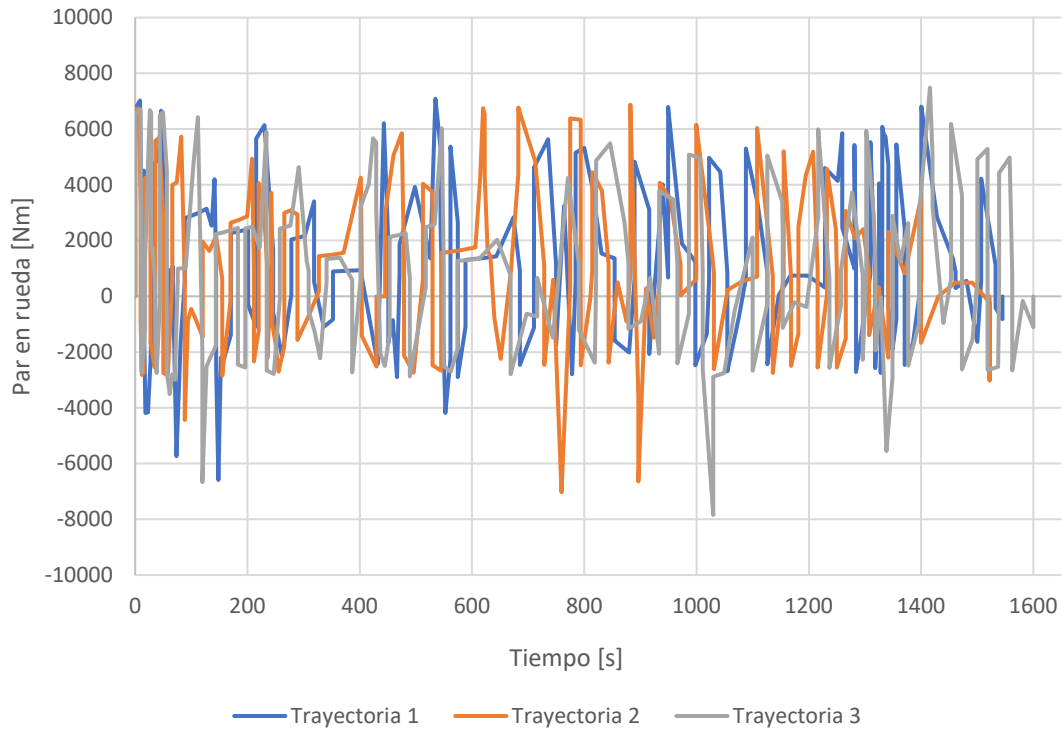


Gráfico 6.3.- Par en rueda requerido en función del tiempo para el trayecto desde la Puerta del Carmen a Montecanal (IDA)

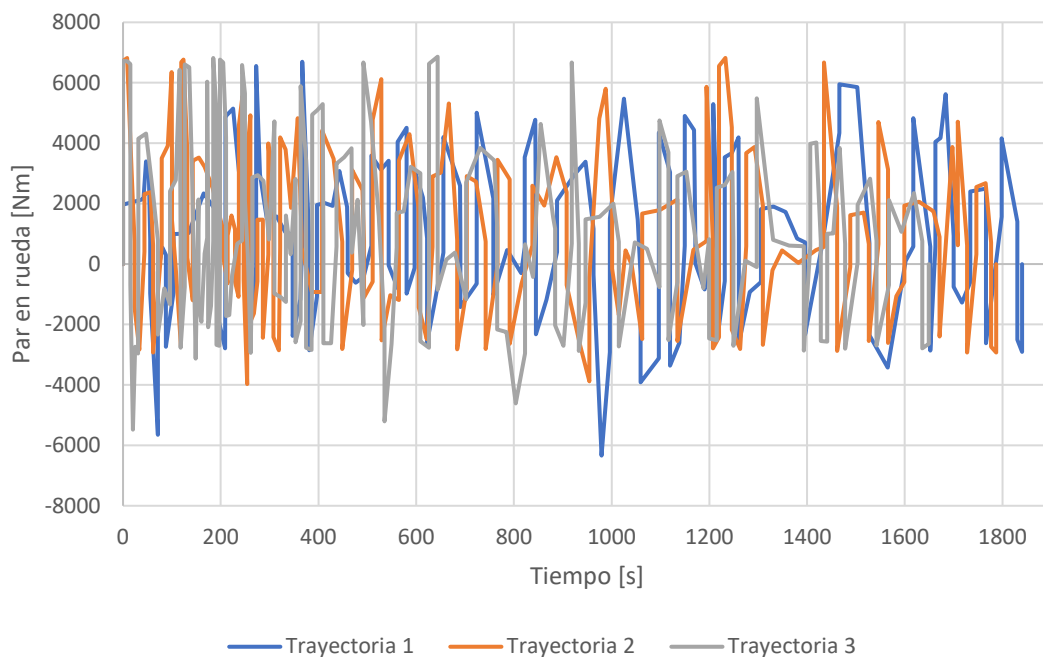


Gráfico 6.4.- Par en rueda requerido en función del tiempo para el trayecto desde Montecanal a Puerta del Carmen (VUELTA)

En conclusión, puede establecerse que, tal y como refleja la Tabla 6.1, los consumos por kilómetro, el consumo total y la distancia recorrida son similares en todos los trayectos. Se puede comprobar que la distancia recorrida en la VUELTA es ligeramente superior a la IDA en todos los trayectos. En cuanto al consumo por kilómetro, tanto los trayectos a la ida como a la vuelta, tienen valores

similares, siendo superiores los consumos del trayecto desde la Puerta del Carmen hasta Montecanal (IDA).

Tabla 6.1.- Resultados promedio característicos de los trayectos realizados

Trayecto	Consumo [kWh/km]	Energía total acumulada [kWh]	Distancia recorrida [km]	Tiempo de recorrido [h]
1 ida	1,083	9,746	9	0,43
2 ida	1,081	9,688	8,963	0,42
3 ida	1,177	10,07	8,551	0,44
Media IDA	1,114	9,835	8,838	0,43
1 vuelta	1,003	10,07	10,04	0,51
2 vuelta	0,9851	9,58	9,726	0,49
3 vuelta	1,091	9,78	8,972	0,46
Media VUELTA	1,026	9,81	9,579	0,49

En la Tabla 6.2 se muestran los valores que debe tener el motor del autobús para que pueda realizar sin problemas ambas trayectorias.

Tabla 6.2.- Valores requeridos para el motor del autobús simulado

Variables	Potencia requerida [kW]	Par motor necesario* [Nm]
Valores	160	1400

*Para el caso de una relación de transmisión de 5:1

7. Selección del motor

El motor es el elemento más importante de todo vehículo ya que es el encargado de suministrar potencia para permitir su movimiento. La variedad de motores eléctricos que se pueden encontrar en el mercado hoy en día es considerable. Dependiendo de las características que se requieran se podrá escoger entre unos y otros.

7.1 Tipos de motores

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotatorias compuestas por un estator y un rotor. El estator es la parte fija del motor, mientras que el rotor es la parte móvil.

Dependiendo del tipo de motor, el devanado de cobre que introduce la corriente se encontrará en el rotor o en el estator. Además, dependiendo del tipo de motor, la corriente requerida para su funcionamiento será continua o alterna. A continuación, se exponen los tipos de motores eléctricos actualmente disponibles en el mercado, para más información acudir al Anexo E.

- Motor DC-Brushed (motor de corriente continua con escobillas).
- Motor de inducción.
- Motor de imanes permanentes.
- Motor de reluctancia conmutado.

De todos los motores se intentará buscar aquellos que tengan un control más sencillo. De todos los mencionados anteriormente los que presentan un control más simple es el motor de corriente continua y el DC-Brushless. Dado que el motor de corriente continua no es muy eficiente para este tipo de usos, el tipo de motor que vamos a seleccionar para el autobús es el DC-Brushless.

7.2 Selección de motor

Debido a las necesidades que se requieren en el trayecto seleccionado, tal y como se ha expuesto en la Tabla 6.2, el motor debe tener un mínimo de potencia de 160 kW para poder realizar sin problemas el recorrido, así como un par de 1400 (para una relación 5:1). Los motores comerciales seleccionados para esta tarea se describen en la Tabla 7.1 con sus principales características

Tabla 7.1.- Modelos de motores [14], [28]–[30]

<i>Motor</i>	<i>Voltaje [V]</i>	<i>Peso [kg]</i>	<i>Eficiencia [%]</i>	<i>Potencia [kW]</i>	<i>Par [Nm]</i>
<i>SS-250-115 GEN 2 SINGLE STACK MOTOR</i>	850	57	95	375	500
<i>EMRAX 348</i>	800	41	92-98	380	1000
<i>Motor autobús Irizar ie 12</i>	800	-	-	180	1500
<i>ZF CeTrax</i>	800	100	-	300	4500

Todas las potencias mostradas en la Tabla 7.1 cubren las necesidades del autobús, pudiendo elegir cualquiera de los motores en función de ésta. La necesidad del par motor, como ya se ha comentado en el capítulo 6 de esta Memoria, puede verse modificada según las relaciones de transmisión que posea el autobús. Estas relaciones de transmisión pueden ser elevadas, llegando incluso a relaciones de 11:1 (636 [Nm] de par motor necesario) lo que supondría que todos los motores de esta lista, a excepción del *SS-250-115 GEN 2 SINGLE STACK MOTOR*, puedan realizar la tarea de motor del autobús.

Para hacer una selección del motor se ha tenido en cuenta el tamaño de batería mínimo a emplear. La batería puede tener 2 limitaciones a la hora de diseñarla, la cantidad de energía almacenada y la potencia que es capaz de suministrar sin sobrepasar su umbral de corriente de descarga máximo. Esto quiere decir que, cuanto mayor potencia sea capaz de suministrar el motor, mayor será la batería a utilizar, debido a la cantidad de corriente de descarga máxima que son capaces de aguantar las celdas de la batería.

Así pues, el motor que permita un tamaño de batería menor, será el que tenga menor potencia y el indicado, ya que el peso y el precio será un factor decisivo en la batería. Ese será el criterio de selección del motor, y por ello se ha elegido el motor que lleva de fábrica el modelo de autobús elegido.

8. Selección de la batería

Una batería es un dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas que permiten convertir la energía química en energía eléctrica y viceversa. Gracias a esta capacidad se puede tener a disposición una determinada cantidad de energía eléctrica para su uso. Del mismo modo

este dispositivo permite su recarga (proceso reversible), por lo que, puede ser utilizado en un número determinado de ciclos carga-descarga.

El funcionamiento de las baterías se basa en un proceso químico reversible llamado reducción-oxidación (redox), en el que uno de los componentes pierde electrones (se oxida), mientras que el otro los gana (se reduce).

La batería es el dispositivo de almacenaje energético del vehículo eléctrico y es por eso, por lo que la selección de la batería es una parte crucial. De un tiempo a esta parte se han ampliado mucho los tipos de batería disponibles en el mercado, nombrándose a continuación. Para más información acudir al Anexo F.

- Batería plomo-ácido.
- Baterías Ni-Cd.
- Baterías Níquel-Metal hidruro.
- Baterías ion Litio.
- Baterías Metal-Aire.

A partir de los datos obtenidos en el estudio de campo de los itinerarios de autobús, se va a hacer una comparación de todas las baterías explicadas. Esta comparativa, servirá para averiguar cuál es el mejor tipo de batería para un autobús eléctrico, que cubra las necesidades de la Línea 41 de transportes urbanos de Zaragoza.

8.1 Comparación de baterías

Debido a que las baterías metal-aire todavía se encuentran en fase de investigación y desarrollo, no se van a tener en cuenta puesto que no se pueden encontrar en modelo comercial.

Como se puede ver en la Figura 8.1, la mejor opción para una batería de vehículo eléctrico es del tipo ion-litio. Aunque se ha tomado un valor medio de sus características, sigue siendo el mejor tipo de batería en cuanto a características se refiere.

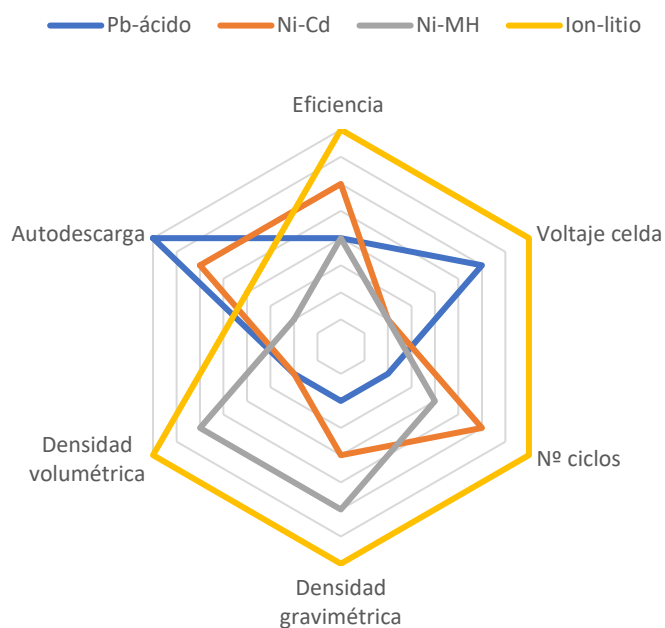


Gráfico 8.1.- Comparativa entre tipos de baterías. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se puede ver en el Anexo F, hay muchas variantes de la batería de ion-litio. Esto genera que haya variedad de características entre ellas y por tanto requiere de una comparativa entre todos los tipos de baterías de ion-litio. La figura 8.2 muestra las diferencias entre todas ellas basadas en cuatro características: voltaje, densidad gravimétrica, fallo térmico y número de ciclos.

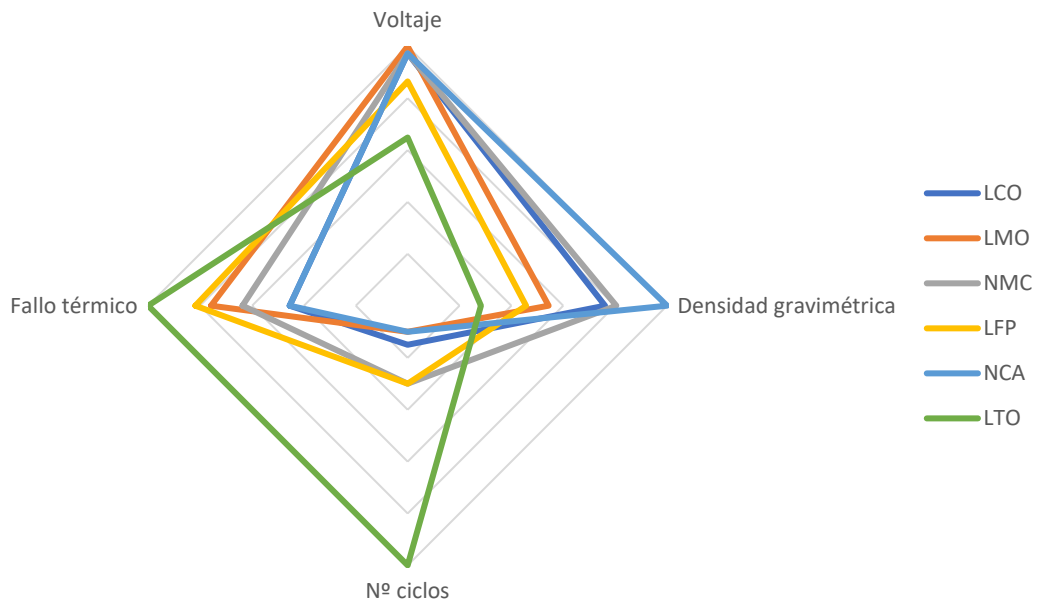


Gráfico 8.2.- Comparativa de características de baterías de ion-litio. Fuente: Elaboración propia

En esta comparación, hay una mayor variación entre las diversas opciones. Para un vehículo eléctrico las prioridades de una batería tienen que ser que: el voltaje sea suficiente para requerir de menor tamaño de batería, una densidad gravimétrica elevada para, nuevamente, reducir el peso de la batería del vehículo manteniendo la potencia, y un número de ciclos elevado para que la batería dure lo máximo posible y requiera del mínimo mantenimiento.

De las opciones comparadas se pueden descartar directamente la de titanato de litio (LTO), aunque tiene la vida más larga y es la más segura de todas, por la elevada temperatura que requiere su fallo térmico, tiene la densidad gravimétrica más baja y el menor voltaje de todos.

En cuanto a la batería de óxido de litio-manganeso (LMO) presenta un voltaje muy elevado, siendo éste el mayor de todos. Además, tiene una densidad gravimétrica media y un fallo térmico alto, pero su vida útil es muy reducida, lo cual es un requerimiento para reducir el mantenimiento del vehículo.

La batería de litio fosfato de hierro (LFP) tiene un voltaje medio, su fallo térmico se produce a temperaturas elevadas y la vida útil es considerablemente alta, pero la capacidad específica es baja y su voltaje es el segundo más bajo de todos los tipos de variantes.

Entre las tres variantes de mejores prestaciones, la elegida teniendo en cuenta las condiciones para las que se va a usar, sería la batería de litio níquel manganeso óxido de cobalto (NMC). No tiene la mayor densidad gravimétrica de las tres, pero tiene el doble de vida útil que las dos restantes. Para un vehículo eléctrico es importante que las baterías duren lo máximo posible, en

cuanto a ciclos de vida, con el fin de no tener que cambiar todas las baterías que son una de las partes más caras e importantes del vehículo.

8.2 Cálculo de la batería

En este subcapítulo, se van a realizar los cálculos pertinentes para obtener el tamaño de batería adecuado para el funcionamiento del autobús.

Como se ha indicado en el apartado 4.1 este autobús comienza a hacer el recorrido desde las 7:00 y acaba a las 23:00. Esto hace un total de 16 horas ininterrumpidas, con 2 de 8 horas para cada uno de los 2 conductores que cubren el mismo día.

Tal y como se muestra en la Tabla 6.1 la suma de los tiempos medios de ambos trayectos suma 0,92 horas por lo que podemos redondearlo a la hora completa. Así pues, un autobús un día normal de trabajo realiza 16 trayectos iguales aproximadamente. Debido al motor que se ha elegido para el autobús, la batería debe tener una tensión de 800 V para que el motor funcione correctamente.

Así pues, si se toma el consumo medio de energía en un trayecto de IDA y VUELTA (Tabla 6.1) nos da un consumo total de 19,64 kWh, ver (ec. 8.1):

$$\frac{\text{Consumo total}}{\text{viaje}} = 9,835 + 9,81 = 19,645 \text{ kWh/trayecto} \quad (\text{ec. 8.1})$$

A este consumo del transporte también hay que añadirle el consumo del aire acondicionado o de la calefacción según se requiera. Si tenemos en cuenta los valores de la calefacción del autobús (Tabla 4.1), el consumo más grande se realiza cuando se usa la calefacción (13 y 32 kW). Suponiendo un uso de la calefacción del 60% cada hora el consumo por trayecto queda en un total de 46,64 kWh/trayecto, según se muestra en la (ec. 8.2).

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= 19,645 \frac{\text{kWh}}{\text{trayecto}} + 0,6 \frac{\text{horas}}{\text{hora}} * 1 \frac{\text{hora}}{\text{trayecto}} * (13 + 32) \text{kW} \\ &= 46,64 \text{ kWh/trayecto} \end{aligned} \quad (\text{ec. 8.2})$$

Por lo que la energía necesaria para cubrir todos los trayectos de un día laboral es:

$$\text{Energía total} = 46,64 \text{ kWh/trayecto} * 16 \text{ trayectos/día} = 746,24 \text{ kWh/día} \quad (\text{ec. 8.3})$$

Por último, hay que asegurar que el autobús es capaz de volver a cocheras. Dependiendo de donde acabe el autobús el día tiene una distancia diferente como se puede ver en la Tabla 8.1. Para asegurar el suministro de energía se va a tomar el supuesto más desfavorable que sería acabar y empezar en el Hospital Viamed Montecanal. Se va a suponer el consumo medio más elevado de la Tabla 6.1 para calcular la energía necesaria para ir y volver de cocheras.

Tabla 8.1.- Distancias a cocheras desde finales de línea

Lugar	Distancia [km]
Puerta del Carmen	5,1
Hospital Viamed Montecanal	15,5

Sumando este consumo, la energía total necesaria es de:

$$\text{Energía total} = 746,24 \text{ kWh/día} + 2 * 15,5 \text{ km} * 1,114 \text{ kWh/km} = 780,77 \text{ kWh} \quad (\text{ec. 8.4})$$

Hay que tener en cuenta que las baterías que se van a utilizar son de ion-litio, y que para éstas es de gran importancia que no se baje de una determinada carga de energía (SOC) que ronda el 20%. Para asegurar este 20% hay que añadirlo a la energía total requerida.

$$\text{Energía total} = 780,77 \text{ kWh} * 1,2 = 936,93 \text{ kWh} \quad (\text{ec. 8.5})$$

El voltaje necesario del motor es de 800 V por lo que los Ah necesarios para un trayecto serían:

$$\text{Ah necesarios} = \frac{936,93 \text{ kWh}}{800 \text{ V}} = 1,171 \text{ kAh} = 1171 \text{ Ah} \quad (\text{ec. 8.6})$$

Una vez obtenidas las necesidades, hay que saber que celda comercial podría cubrir las. Para ello se van a comparar las celdas comerciales de ion-litio, ya que son las que mejores resultados podían ofrecer para el uso que se le va a dar. En la Tabla 8.2 se muestran sus características.

Tabla 8.2.- Características de celdas comerciales [31]–[34]

Designación	Tensión [V]	Capacidad [Ah]	Peso [g]	Precio unitario [€]	Corriente de descarga máxima [mA]
Samsung-INR18650-35E	3,6	3,35	50	6,89	8000
Sony-US14500VR	3	0,715	19,3	6,11	715
LG-INR18650-F1L	3,7	3,35	49	6,55	4875
Samsung-INR21700-50E	3,6	5	69	8,49	9800

Así pues, dependiendo de la batería se requerirá de una cantidad determinada de baterías dispuestas en serie y en paralelo. Usando los resultados obtenidos de energía total (ec. 8.5), Ah (ec. 8.6) y las características de cada celda (Tabla 8.2) las necesidades de la batería se muestran en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3.- Cálculo de tamaño de baterías para 16 trayectos

Designación	Celdas en serie	Celdas en paralelo	Celdas totales	Peso [kg]	Precio [€]
Samsung-INR18650-35E	223	350	78050	3902,5	537764,5
Sony-US14500VR	267	1638	437346	8440,8	2672484,1
LG-INR18650-F1L	217	350	75950	3721,6	497472,5
Samsung-INR21700-50E	223	235	52405	3615,9	444918,4

Como se puede ver en la Tabla 8.3, tanto el peso de las baterías como el precio es muy elevado. Es por eso, por lo que se plantea, en el caso de los autobuses urbanos, la llamada carga de oportunidad. Ésta consiste en realizar una carga rápida de la batería en los finales de línea, aprovechando el descanso de 5 minutos entre fin y comienzo de trayecto. De esta manera el tamaño y el precio de las baterías se reduce drásticamente ya que no hace falta contar con toda la energía almacenada.

Siguiendo esta estrategia se pueden realizar varias opciones, diseñar la batería para un único trayecto tendiendo que realizar la parada al final de cada trayecto (IDA o VUELTA), o tener una batería intermedia que aguante unos cuantos trayectos completos para no tener que parar siempre en los finales de línea.

Como ya se ha podido ver en la Tabla 8.3, la batería *Sony-US14500VR* es con diferencia la peor de todas las celdas sujetas a estudio, ya que es la más pesada y la más costosa. Por este motivo para el resto de los cálculos no se tendrá en cuenta.

Para el caso de la batería para un trayecto además de tener en cuenta la limitación de la energía, también hay que tener en cuenta la potencia máxima que puede requerir el motor en momentos puntuales. Es por eso por lo que el número de las celdas en paralelo está determinado por la potencia del motor, en este caso tal y como se indica en el capítulo 7 de esta Memoria, es de 180 kW.

Tabla 8.4.- Cálculo tamaño de batería para 1 trayecto

Designación	Celdas en serie	Celdas en paralelo	Celdas totales	Peso [kg]	Precio [€]
<i>Samsung-INR18650-35E</i>	223	37	8251	412,6	56849,4
<i>LG-INR18650-F1L</i>	217	47	10199	499,8	66803,5
<i>Samsung-INR21700-50E</i>	223	25	5575	384,7	47331,8

Tabla 8.5.- Cálculo tamaño de batería para 3 trayectos

Designación	Celdas en serie	Celdas en paralelo	Celdas totales	Peso [kg]	Precio [€]
<i>Samsung-INR18650-35E</i>	223	79	17617	880,9	121381,1
<i>LG-INR18650-F1L</i>	217	79	17143	840,0	112286,6
<i>Samsung-INR21700-50E</i>	223	53	11819	815,5	100343,31

En ambos casos, 1 o 3 trayectos, (tabla 8.4 y 8.5 respectivamente) la batería elegida es la *Samsung-INR21700-50E* ya que es la más ligera y la más barata. En cuanto a las opciones del tamaño de batería, se les pueden ver ventajas e inconvenientes.

La batería que proporciona energía para un trayecto es más liviana y menos costosa, aunque en caso de que el consumo sea irregular, el autobús se puede quedar sin batería. Esto no ocurre en el segundo caso, debido a que está pensado para aguantar hasta 3 trayectos, lo que permite en caso de llevar retraso por el tráfico, no cargar el autobús y seguir conduciendo sin realizar la carga de oportunidad.

Como conclusión, la mejor opción de la batería es la que proporciona 3 trayectos, ya que da cierto margen de seguridad al conductor por si se produjera alguna eventualidad en el recorrido que haga que el consumo se dispare. Dado que el peso no se incrementa en exceso y el precio, aunque más alto es razonable comparado con la batería completa, parece la opción más segura y rentable a largo plazo. En la Tabla 8.6 se resumen las características de la batería comercial seleccionada para el autobús.

Tabla 8.6.- Batería seleccionada para autobús

Designación	Celdas en serie	Celdas en paralelo	Celdas totales	Peso [kg]	Precio [€]
Samsung-INR21700-50E	223	53	11819	815,5	100343,31

9. Métodos de carga

Uno de los principales problemas que tienen las baterías para vehículos grandes es el tamaño y el peso que suponen al conjunto. Como ya se ha comentado, una posible solución a este problema son las cargas de oportunidad. Esta práctica, consiste en instalar una serie de puntos de recarga en lugares estratégicos para que el autobús pueda recargar parcialmente su batería. De esta forma, instalando estos puntos de recarga, el tamaño de las baterías se reduce de manera sustancial, provocando que éstas sean más pequeñas y por tanto más baratas y menos pesadas.

Hay diferentes modos de carga dependiendo de las necesidades que se intenten cubrir. La Tabla 9.1 describe todos los modos de carga posibles según la normativa IEC-61851-1.

Tabla 9.1.- Tipos de carga según IEC-61851-1 [35]

Modo de carga	Tipo de carga	Corriente máxima	Potencia máxima	Tiempo de carga para 50 kWh	Conexiones
Modo 1	Lento	16 A, AC, Mono fase	3,7 kW	14 h	-
Modo 2	Rápido	32 A, AC, Mono fase	7,4 kW	7 h	Cable con piloto de control y protecciones
		32 A, AC, Trifásico	22 kW	>2h	
Modo 3	Muy rápido	62 A, AC, Trifásico	43 kW	>1h	Conexión VE y red
Modo 4	Ultra rápido	400 A, DC	200 kW	15 min *	Conexión VE y cargador externo

* Las baterías no pueden cargarse al máximo con la potencia máxima

En el caso del autobús eléctrico, lo que se busca es una carga rápida, que permita cargar la batería mientras se realiza una parada a final de línea. Es por eso por lo que, el modo principal para hacer carga de oportunidad es el modo 4.

A continuación, se pasará a ver las posibles formas de implementar este modo de carga al autobús.

9.1 Carga por catenaria

Este tipo de carga, (Figura 9.1) se realiza mediante dos elementos diferenciados. El primero de ellos es el cargador, el cual se sitúa en un pilar de 5 m de altura. El segundo sería el pantógrafo, que es el elemento que conecta el autobús con el cargador y que permite comenzar la carga.

Para que la carga pueda hacerse de forma eficaz, tanto el autobús como el cargador tienen que estar conectados, permitiendo así el modo de carga 4 (ver tabla 9.1), el cual es idóneo para realizar cargas rápidas de oportunidad. Para que la conexión tenga lugar de manera correcta se usa una serie de sensores:

- Sensor de aproximación: Situado en la parte delantera del techo del autobús para avisar al sistema de la aproximación del vehículo.
- Sensor de posición en la parte posterior del techo del autobús para preparar el brazo y acoplarse a la campana del cargador y comenzar la carga.

Las ventajas presentes en este tipo de carga son [36]:

- Actualmente la potencia que es capaz de entregar este tipo de carga es mayor que la inducción.
- La tecnología utilizada es ya conocida debido a su uso en trenes y trolebuses.
- No hay ningún tipo de campos magnéticos que puedan perjudicar la salud de las personas.

En cuanto a las desventajas:

- Este tipo de carga solo puede ser usada si el vehículo en cuestión está preparado para ello, ya que requiere de un contacto en la parte superior del vehículo para realizar la carga.
- Al existir cierto movimiento del sistema de carga se pueden producir fallos.
- Al ser una estructura visible, son susceptibles de vandalismo.



Figura 9.1.- Pantógrafo de carga ultra-rápida Fuente: [37]

9.2 Carga sin contacto

La otra opción para implementar la carga de oportunidad, es la carga de transferencia de *potencia sin conexión* (WPT). Dentro de este tipo de carga, hay una serie de formas de conseguir que la carga se realice sin conexión, y que se describen a continuación.

WPT de resonancia magnética

Se fundamenta en la inducción para realizar la carga sin conexión. Se basa en el uso de las bobinas, una conectada a la red y la otra al vehículo (ver esquema en la Figura 9.2). En la primera se hace pasar corriente y ésta crea un campo magnético, el cual hace que la bobina del vehículo genere electricidad para el vehículo. En caso de que sea necesario se puede realizar a la inversa.

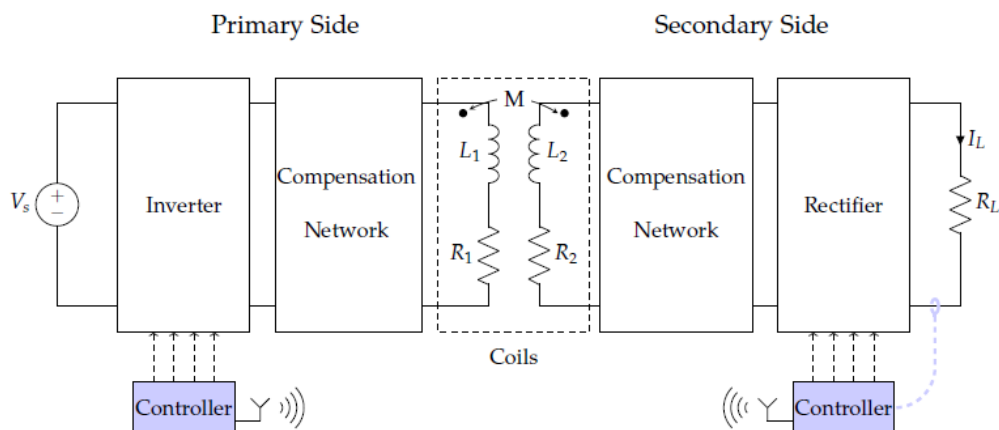


Figura 9.2.- Estructura de una estación de resonancia magnética. Fuente: [38]

WPT capacitivos

Funciona mediante el campo eléctrico generado por el área que se crea entre 2 condensadores. Estos condensadores están formados entre dos placas, una dispuesta en el cargador y la otra en el vehículo (ver Figura 9.3). Funciona de forma similar al cargado de resonancia. Cuando las placas se juntan se forman unos condensadores que crean un campo eléctrico e inducen una corriente que va a las baterías del vehículo.

La ventaja de este tipo de cargadores con respecto a los cargadores por resonancia es que pueden realizar una carga efectiva incluso con barras metálicas y sin tener pérdidas relevantes. Otra ventaja, es que el campo eléctrico que se genera está contenido entre las placas de los condensadores. Esto hace que este tipo de cargador sea más seguro que el cargador de resonancia magnética.

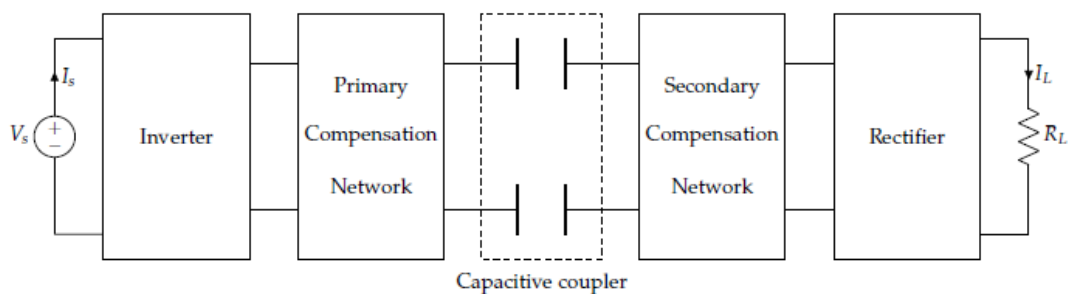


Figura 9.3.- Estructura de un cargador sin conexión capacitivo. Fuente: [38]

Transferencia de potencia mediante microondas

Este tipo de tecnología se basa en la generación de microondas mediante un magnetrón (ver Figura 9.4). Estas microondas pasan por un filtro de ondas y luego son irradiadas por la antena emisora. Estas microondas pasan a la antena receptora, que convierte esas microondas en una señal de corriente continua.

Para la carga de vehículos eléctricos tiene ciertas limitaciones:

- La transmisión de energía solo se puede hacer en una dirección, lo que dificulta la implementación de la *SmartGrid*.
- Para grandes potencias requiere de unas antenas demasiado voluminosas para algunos lugares.
- La eficiencia de esta tecnología es inferior a la carga inductiva o capacitiva.

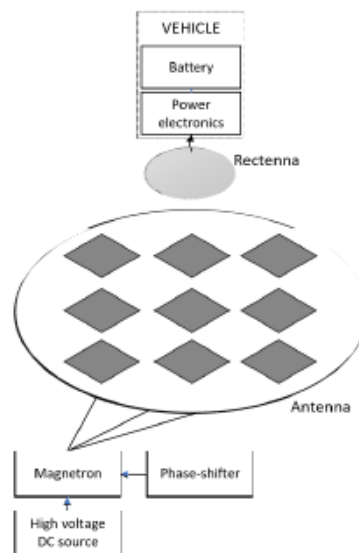


Figura 9.4.- Estructura de carga por microondas. Fuente: [38]

WPT óptico

Se basa en el uso de un láser para transmisión de energía. El emisor está compuesto por un diodo láser y un concentrador de haz de luz (ver Figura 9.5), mientras que el receptor está formado por celdas fotovoltaicas que transforman la luz del láser en electricidad.

Al igual que el cargador de microondas, este también tiene ciertas limitaciones como tecnología de carga de vehículos eléctricos:

- Baja eficiencia comparada con carga inductiva y capacitiva.
- Bajos niveles de potencia limitados por riesgo de daños humanos.
- Dificultades de orientación del haz láser.
- Carga de una única dirección.

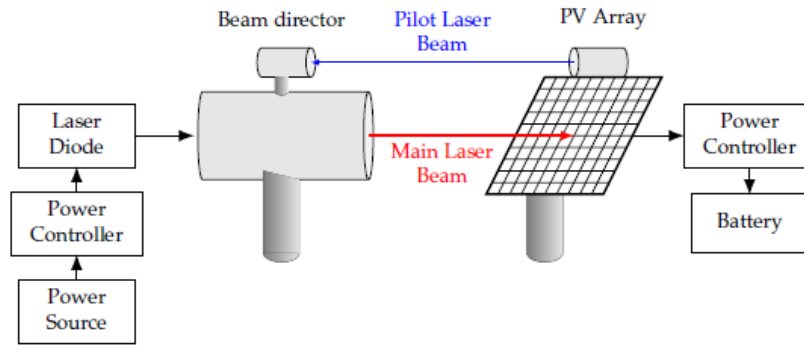


Figura 9.5.- Estructura cargador óptico sin conexión. Fuente: [38]

En definitiva, la Tabla 9.2 recoge las principales características de los distintos métodos de carga sin conexión descritos.

Tabla 9.2.- Comparativa entre los diversos métodos de carga sin conexión [39]

Tecnología	Transferencia de potencia	Eficiencia [%]	Flujo bidireccional	Espacio	Objetos intermedios	En movimiento	Coste
Resonancia	Alta	90-95	Sí	<30 cm	Sí	Sí	Medio
Capacitiva	Media	80-85	Sí	<30 cm	Sí	Sí	Bajo
Micoroondas	Baja	40-50	No	>1 km	No	No	Alto
Laser	Baja	1-15	No	>1 km	No	No	Alto

Debido al uso que se le quiere dar en este estudio, de todos los tipos de carga solo son usables la resonancia magnética y la transmisión capacitiva debido a las potencias que son requeridas. La capacitiva se queda atrás en potencia, pero es más segura y barata, así que, si la potencia requerida entra dentro de su rango de uso es la mejor opción de todas. Si es más elevada se tiene que implementar la transmisión por resonancia magnética.

9.3 Cálculo del cargador

Teniendo en cuenta las especificaciones de las posibles baterías seleccionadas para el autobús (Tablas 8.4 y 8.5). La instalación va a tener que surtir al autobús de la energía necesaria para realizar el trayecto de IDA o VUELTA. Se va a estimar que la parada de final de línea de los autobuses tiene una duración de 5 minutos.

Para ambos casos la cantidad de energía que se requiere cargar, teniendo en cuenta que el consumo por trayecto es de 46,64 kWh (ec. 8.2), será.

$$\text{Carga a realizar en cada fin de línea} = \frac{46,64 \text{ kWh}}{2} = 23,32 \text{ kWh} \quad (\text{ec. 9.1})$$

Una vez obtenida la energía necesaria y sabiendo el tiempo en horas en el que se tiene que realizar la carga, el resultado es que la potencia necesaria para el cargador será de 280,36 kW (ec. 9.2).

$$\text{Potencia necesaria} = \frac{23,27 \text{ kWh}}{0,083 \text{ h}} = 280,36 \text{ kW} \quad (\text{ec. 9.2})$$

Esta potencia necesaria acota la tecnología que se puede usar a pantógrafo y a WPT de resonancia magnética, ya que los capacitivos no pueden llegar a tanta potencia. Entre estas dos opciones hay que tener en cuenta sus puntos fuertes y sus debilidades.

El pantógrafo es una tecnología que se conoce muy bien debido a los trenes eléctricos, mientras que la carga por resonancia todavía se encuentra en desarrollo. Por otro lado, el pantógrafo presenta una mayor contaminación visual que el cargador por resonancia, por lo que dependiendo de las zonas por la que circulase el autobús sería más apropiado la carga por resonancia para no afectar paisajísticamente a zonas urbanas. Por otro lado, el cargador por resonancia puede llegar a ser muy perjudicial debido al gran campo magnético que se genera para realizar la carga rápida. Esto no sucede con el pantógrafo. Pese a esto, el pantógrafo es susceptible de vandalismo mientras que el cargador por resonancia es muy difícil que sufra este tipo de situaciones.

Dado que diseñar un autobús que permita ambos tipos de carga es inviable debido al coste añadido que supone, se tiene que centrar en un tipo de carga rápida específico, más allá de la carga mediante cargador convencional.

Como conclusión, la mejor opción sería la de un cargador por resonancia, está más protegido ante posibles vandalismos y evita la contaminación visual, que para zonas céntricas es muy importante.

10. Autobús de hidrógeno

La otra alternativa al autobús eléctrico es el autobús propulsado mediante una pila de combustible alimentada por hidrógeno. Al igual que el vehículo eléctrico, el vehículo de pila de combustible no expulsa ningún tipo de gases contaminantes de efecto invernadero.

Pese a que, el vehículo de hidrógeno no produce gases contaminantes, el método actual más común por el que se obtiene este hidrógeno es mediante reformado de metano. Este proceso tiene un carácter contaminante ya que el metano se obtiene del gas natural o del petróleo. Así pues, actualmente la mayor parte del hidrógeno que se produce genera gases contaminantes debido a la obtención de su naturaleza. Pero también se puede obtener mediante electrólisis, este método utiliza la electricidad para dissociar del agua el oxígeno y el hidrógeno. Si la electricidad usada para este método es limpia el hidrógeno producido no generaría emisión de gases contaminantes [39].

Teniendo en cuenta el mapa eléctrico de Reino Unido y la forma de producción de hidrógeno del país, en 2017 se calculó que las emisiones de CO₂ de los autobuses de hidrógeno eran 5,9 MtCO₂ mientras que las de los autobuses eléctricos llegaron a las 2,4 MtCO₂. Suponiendo diversos posibles escenarios en 2050, para todos ellos, el autobús de hidrógeno emite una mayor cantidad de CO₂ a la atmósfera que el autobús eléctrico.

Esta diferencia de emisiones viene en parte producida por la diferencia de eficacias de ambas tecnologías. La ventaja de los vehículos eléctricos es que su conversión de electricidad a potencia para el vehículo es más efectiva que el vehículo de hidrógeno. Actualmente el consumo de un autobús eléctrico de media es 1,2 kWh/km mientras que el autobús de hidrógeno ronda los 1,8 kWh/km [40].

Además de todo esto, hay que sumar una serie de retos que hay que completar antes de que los autobuses de hidrógeno se puedan comercializar. Uno de estos retos sería extender el tiempo de vida de las células de combustible, otro es reducir el coste del sistema de transmisión de la célula de combustible. A todo esto, se le suma la problemática de la poca existencia de generación de hidrógeno y de estaciones de recarga para este tipo de vehículos. Esta infraestructura es muy similar a la que se emplea para los vehículos de combustión interna [41].

Entonces, por qué el autobús de hidrógeno, cuál es la ventaja que tiene frente a los autobuses eléctricos que son más eficaces. El primer viaje de un autobús eléctrico entre Barcelona y Madrid que rondaba los 600 km tardó un total de 14 horas debido a los tiempos de repostaje. Es el gran problema que tienen los vehículos eléctricos hoy en día, el tiempo de repostaje es elevado y la infraestructura de carga todavía no está del todo asentada. Aunque era una prueba piloto y se supuso un extra de paradas de recarga para asegurar la llegada del autobús, no deja de ser un número de horas muy elevado [42].

Esta tardanza de carga no está presente en los vehículos de hidrógeno ya que es similar a un vehículo convencional.

En conclusión, hoy en día es indudable que el autobús eléctrico es superior al autobús de hidrógeno en todos los aspectos salvo en el tiempo de recarga. Esto hace que los autobuses eléctricos sean los mejores para realizar tareas de buses urbanos, ya que gracias a la carga de oportunidad pueden hacer la tarea de manera idónea. En cambio, cuando el trayecto es largo, el vehículo de hidrógeno puede ser más eficaz en cuanto a tiempo de viaje debido al menor tiempo de repostaje.

11. Conclusión

A lo largo de este proyecto se han ido desgranando las partes más relevantes de un autobús eléctrico y se han obtenido los requerimientos de dichas partes para un autobús urbano, partiendo de datos tomados reales de la línea 41 de autobuses de Zaragoza. De la simulación realizada se puede destacar lo siguiente:

- Tras las simulaciones realizadas, el autobús requiere de una potencia motora de mínimo 160 kW tanto para el trayecto de IDA como el de VUELTA. Como se puede ver en la Tabla 11.1 tanto el consumo de la IDA como de la VUELTA son muy similares y rondan 1 [kWh/km].

Tabla 11.1.- Resumen datos simulados

Trayecto	Consumo [kWh/km]	Energía total acumulada [kWh]	Distancia recorrida [km]	Tiempo de recorrido [h]
Media IDA	1,114	9,835	8,838	0,43
Media VUELTA	1,026	9,81	9,579	0,49

En cuanto al estudio de las diversas partes del autobús:

- De todos los motores estudiados se ha determinado que el motor que incorpora el modelo de autobús estudiado es el idóneo para esta aplicación (Tabla 11.2).

Tabla 11.2.- Resumen motor seleccionado

Motor	Voltaje [V]	Peso [kg]	Eficiencia [%]	Potencia [kW]	Par [Nm]
Motor autobús Irizar ie 12	800	-	-	180	1500

- Sobre la batería, se ha determinado que el mejor tipo de batería para un vehículo eléctrico es la batería de ion-litio. Dentro de este tipo de baterías, se ha concluido que la idónea para cumplir la función de batería de un vehículo eléctrico, es la de litio Níquel Manganeso óxido de Cobalto (NMC).
- Dentro de los modelos comerciales de celdas analizadas se ha elegido la *Samsung- INR21700-50E* por ser la más barata y menos pesada (Tabla 8.6).
- En cuanto al método de carga de oportunidad se ha determinado que, debido al recorrido que realiza la ruta seleccionada, la mejor opción es la carga por resonancia.
- En cuanto a la potencia necesaria para realizar la carga de oportunidad se ha calculado que es de 280,36 kW (ec. 9.2).

Sobre la comparativa del autobús de hidrógeno y eléctrico se ha llegado a la conclusión que indiscutiblemente el autobús eléctrico es superior al autobús de hidrógeno a excepción de la autonomía y la velocidad de recarga. Lo que hace que el autobús eléctrico sea idóneo para ciudad donde puede realizar carga de oportunidad, mientras que para transporte nacional el autobús de hidrógeno es una mejor opción hoy en día debido a su facilidad de repostaje.

Para finalizar, las aplicaciones de este trabajo son inmediatas. Si bien no representa un muestreo extenso de todas las líneas de autobuses de Zaragoza, puede servir para realizar una primera aproximación de la potencia requerida por el autobús, el tamaño de batería y la potencia requerida por el cargador.

En cuanto a posibles ampliaciones del trabajo. Se podría hacer un estudio sobre los puntos más estratégicos donde disponer las estaciones de carga de oportunidad, para que estas cubran toda la demanda de autobuses que hay en Zaragoza.

Tomando la potencia de carga requerida para un autobús y unido al estudio anterior, se podría hacer un análisis de las repercusiones que pueda tener la carga simultánea todas las estaciones de carga de oportunidad en la red. Esto se podría expandir con su posible solución.

12. Bibliografía

- [1] A. de Zaragoza, "El transporte público en Zaragoza alcanzó en 2019 su mejor dato en diez años, con una cifra global de 123.037.288 viajeros," 2020. <https://www.zaragoza.es/sede/servicio/noticia/229734> (accessed Aug. 18, 2021).
- [2] Comisión Europea, "El Pacto Verde Europeo," *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones.*, no. Bruselas, 11.12.2019 COM(2019) 640 final COMUNICACIÓN, p. 28, 2019.

- [3] United States Environmental Protection Agency, "Sources of Greenhouse Gas Emissions," 2019. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions> (accessed Aug. 20, 2021).
- [4] Wikipedia, "Pico petrolero," *Wikipedia*, 2009. https://es.wikipedia.org/wiki/Pico_petrolero (accessed Aug. 20, 2021).
- [5] U.S. Energy Information Administration, "Growing global production limits crude oil price increases in the most recent forecast," *Eia*, 2021. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=48376> (accessed Jul. 13, 2021).
- [6] BP, "Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets .," p. 66, 2020, [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
- [7] Electromovilidad, "Historia del vehículo eléctrico," 2021. <http://electromovilidad.net/historia-del-vehiculo-electrico/> (accessed Jul. 13, 2021).
- [8] Wikipedia, "Historia del vehículo eléctrico," 2021. https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_vehículo_eléctrico (accessed Jul. 13, 2021).
- [9] Wikipedia, "Batería de plomo ácido," *Wikipedia*, 2006. https://es.wikipedia.org/wiki/Batería_de_plomo_y_ácido (accessed Aug. 31, 2021).
- [10] A. Prieto Amaya, "Historia del autobús," *autonoción*, 2018. <https://www.autonocion.com/historia-del-autobus/> (accessed Aug. 31, 2021).
- [11] D. Gutierrez, "MAN 750 HO-M10 E: así era el primer autobús eléctrico de MAN, nacido hace 50 años," *hibridos y electricos*, 2020. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/curiosidades/man-750-ho-m10-primer-autobus-electrico-man/20200622110004036061.html> (accessed Aug. 31, 2021).
- [12] Wikipedia, "Avanza Zaragoza," 2021. https://es.wikipedia.org/wiki/Avanza_Zaragoza (accessed Jul. 13, 2021).
- [13] Volvo, "Autobús Volvo 7900S," 2021. <https://www.volvobuses.es/es-es/our-offering/buses/volvo-7900-s-charge/specifications.html> (accessed Jul. 13, 2021).
- [14] Irizar e-mobility, "Autobús Irizar ie bus 12," 2021. https://irizar-emobility.com/media/attachments/2021/05/17/ie-bus-12-m_es.pdf (accessed Jul. 13, 2021).
- [15] MAN, "Autobús MAN NM 253," 2020. https://www.bus.man.eu/man/media/content_medien/doc/business_websites_spain/technische_daten/autobuses_urbanos/lion_s_city/A47_Lions_City_M_EURO6.pdf (accessed Jul. 13, 2021).
- [16] L. J. Clancy, *Aerodynamics - Clancy*, First Edition. London: Arnold-Heinemann, 1975.
- [17] C. Bayındırlı and M. Çelik, "The Experimentally and Numerically Determination Of The Drag Coefficient Of A Bus Model," *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, vol. 7, no. 3, pp. 121–123, 2018, doi: 10.18245/ijaet.486409.

- [18] Climate Data, "Temperatura media Zaragoza," 2021. <https://es.climate-data.org/europe/espana/aragon/zaragoza-3316/> (accessed Jul. 18, 2021).
- [19] J. M. Cimbala and Y. a. Cengel, "Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones," *McGrawHill*, vol. Primera Ed, pp. 10–11, 2001.
- [20] T. D. Gillespie, *Fndamentals of Vehicle Dynamics*, vol. 1, no. 2. Society of Atomotive Engineers, Inc, 1992. doi: 10.14778/1454159.1454202.
- [21] L. J. Larminie, James, *Electric Vehicle Technology Explained, Second Edition (2012)*. 2012. [Online]. Available: <http://site.ebrary.com.vlib.interchange.at/lib/stategov/detail.action?docID=10579519&p00=electric+vehicle+technology+explained>
- [22] Formula One Administration Ltd, "Kinetic Energy Recovery Systems (KERS)," 2010. https://web.archive.org/web/20100706214811/http://www.formula1.com/inside_f1/undersanding_the_sport/8763.html (accessed Jul. 18, 2021).
- [23] C. Lampton, "How Regenerative Braking Works," *How Stuff Works*, 2021. <https://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-types/regenerative-braking.htm> (accessed Jul. 18, 2021).
- [24] B. J. Varocky, "Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car," *D&C*, vol. 2, no. D, p. 44, 2011.
- [25] Avanza, "Recorrido línea 41 Avanza Zaragoza," 2021. <https://zaragoza.avanzagrupo.com/lineas-y-horarios/#banner-lineas> (accessed Jul. 13, 2021).
- [26] Javawa, "Convertidor archivos gpx a datos excel," 2021. <https://geo.javawa.nl/trackanalyse/index.php?lang=en> (accessed Jul. 13, 2021).
- [27] Ministerio de Fomento, "Orden FOM/273/2016, de 19 de febrero, por la que se aprueba la Norma 3.1- IC Trazado, de la Instrucción de Carreteras.," *Boletín Oficial del Estado*, vol. 55, no. 1, pp. 17657–17893, 2016.
- [28] ZF, "Motor CeTrax-ZF," 2020. https://www.zf.com/products/en/trucks/products_50564.html (accessed Jul. 13, 2021).
- [29] Emrax, "Motor Emrax 348," 2005. <https://emrax.com/e-motors/emrax-348/> (accessed Jul. 13, 2021).
- [30] Cascadiamotion, "Motor SS-250 Gen2 Single Stack," 2019. <https://cascadiamotion.com/productlist/10-motors/cm-motors/8-ss-250> (accessed Jul. 13, 2021).
- [31] S. SDI, "Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information Inr18650 - 35E," p. 19, 2015, [Online]. Available: <https://www.orbtronic.com/content/samsung-35e-datasheet-inr18650-35e.pdf>
- [32] LG Chem, "Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information INR 18650 F1L," *Building Research & Information*, vol. 21, no. 1, p. 10, 2015, [Online]. Available: https://www.shoptronica.com/files/LG_INR18650_F1L.pdf

- [33] SAMSUNG SDI Co. Ltd., "Specification of Product: Lithium-ion Rechargeable Cell, Spec No. INR21700-50E," no. 0, p. 21, 2017, [Online]. Available: <https://www.shoptronica.com/ficheros/INR21700-50E-5000mAh-Samsung.pdf>
- [34] Sony, "Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information US145000VR," 2012. [Online]. Available: <https://www.powerstream.com/p/us18650v4.pdf>
- [35] K. Mahmud, G. E. Town, S. Morsalin, and M. J. Hossain, "Integration of electric vehicles and management in the internet of energy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, no. November 2017, pp. 4179–4203, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.11.004.
- [36] Oppcharge, "Carga por catenaria," *Oppcharge*, 2021. <https://www.oppcharge.org/> (accessed Jul. 18, 2021).
- [37] O. Urbanas, "Primer punto de carga ultrarrápida por pantógrafo para autobuses eléctricos en España," 2017. <https://www.obrasurbanas.es/carga-ultrarrapida-pantografo/> (accessed Sep. 13, 2021).
- [38] A. Triviño, J. M. González-González, and J. A. Aguado, "Wireless power transfer technologies applied to electric vehicles: A review," *Energies*, vol. 14, no. 6, 2021, doi: 10.3390/en14061547.
- [39] U.S. Energy Information Administration, "Hydrogen explained," 2021. <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/production-of-hydrogen.php> (accessed Jul. 18, 2021).
- [40] K. G. Logan, J. D. Nelson, and A. Hastings, "Electric and hydrogen buses: Shifting from conventionally fuelled cars in the UK," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 85, no. May, p. 102350, 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102350.
- [41] J. Wind, "Hydrogen-fueled road automobiles – Passenger cars and buses," *Compendium of Hydrogen Energy*, vol. 1807, pp. 3–21, 2016, doi: 10.1016/b978-1-78242-364-5.00001-4.
- [42] J. Olesiuk, "El primer viaje en autobús eléctrico entre Barcelona y Madrid tarda 14 horas," *El país*, 2021. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2021-06-14/un-autobus-electrico-culmina-el-primer-viaje-de-largo-recorrido-entre-barcelona-y-madrid.html> (accessed Jul. 18, 2021).
- [43] Weather Online, "Viento en Zaragoza," 2021. https://www.woespana.es/weather/maps/city?LANG=es&PLZ=___&PLZN=___&WMO=08160&CONT=eses&R=0&LEVEL=162®ION=0005&LAND=SP&MOD=tab&ART=WST&NOREGION=0&FMM=1&FYY=2000&LMM=12&LYY=2021 (accessed Jul. 18, 2021).
- [44] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans, *Electric Machinery Fundamentals - 6th ed.* 2003.
- [45] R. Rontome, "Motor de inducción," *279-Motores eléctricos*, 2011. <https://sites.google.com/site/279motoreselectricos/partes-fundamentales-de-un-motor-electrico> (accessed Sep. 12, 2021).
- [46] I. M. Gottlieb, "Practical Electric Motor Handbook," *Practical Electric Motor Handbook*. 1997. doi: 10.1016/b978-0-7506-3638-4.x5000-8.

- [47] D. Linden and T. B. Reddy, *Handbook of batteries*, Tercera. The McGraw-Hill Companies, Inc, 2011. doi: 10.1002/9780470933886.ch1.
- [48] E. Hossain, H. M. R. Faruque, M. S. H. Sunny, N. Mohammad, and N. Nawar, "A comprehensive review on energy storage systems: Types, comparison, current scenario, applications, barriers, and potential solutions, policies, and future prospects," *Energies*, vol. 13, no. 14, 2020, doi: 10.3390/en13143651.
- [49] K. Mahmud, G. E. Town, S. Morsalin, and M. J. Hossain, "Integration of electric vehicles and management in the internet of energy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, no. November 2017, pp. 4179–4203, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.11.004.

Anexo A: Velocidad del viento en Zaragoza

Tabla A.1.- Velocidad media del viento de Zaragoza desde 2000 hasta 2021. Fuente: [43]

Mes	Velocidad media [km/h]
Enero	16,3
Febrero	17,7
Marzo	17,6
Abril	16,8
Mayo	17,0
Junio	16,8
Julio	18,0
Agosto	16,7
Septiembre	15,0
Octubre	13,8
Noviembre	15,4
Diciembre	14,2
Media	16,3

Anexo B: Tabla de recogida de datos

Tabla B.1.- Muestra de tabla con recogida de datos

Trackpoint	Date/time	Lat. [°]	Lng. [°]	Distance [m]	Time	Elevation [m]	Speed [km/h]	Δ Distance [m]	Δ Time [s]	Δ Elevation [m]
1	2021-07-01 09:49:03	41.6490	-0.8885	0	00:00:00	279.0	38.8	22	2	0.0
2	2021-07-01 09:49:05	41.6491	-0.8887	22	00:00:02	279.0	30.9	17	2	1.0
3	2021-07-01 09:49:07	41.6492	-0.8885	39	00:00:04	280.0	15.1	17	4	3.0
4	2021-07-01 09:49:11	41.6491	-0.8884	55	00:00:08	283.0	22.7	13	2	1.0
5	2021-07-01 09:49:13	41.6491	-0.8882	68	00:00:10	284.0	53.9	30	2	0.0
6	2021-07-01 09:49:15	41.6491	-0.8886	98	00:00:12	284.0	13.3	11	3	-1.0
7	2021-07-01 09:49:18	41.6490	-0.8887	109	00:00:15	283.0	59.0	16	1	-9.0
8	2021-07-01 09:49:19	41.6490	-0.8889	126	00:00:16	274.0	26.8	15	2	2.0
9	2021-07-01 09:49:21	41.6489	-0.8890	140	00:00:18	276.0	30.1	17	2	-4.0
10	2021-07-01 09:49:23	41.6488	-0.8892	157	00:00:20	272.0	10.1	11	4	-2.0
11	2021-07-01 09:49:27	41.6488	-0.8893	168	00:00:24	270.0	7.9	11	5	1.0
12	2021-07-01 09:49:32	41.6487	-0.8893	179	00:00:29	271.0	3.3	12	13	3.0
13	2021-07-01 09:49:45	41.6486	-0.8894	191	00:00:42	274.0	13.0	14	4	5.0
14	2021-07-01 09:49:49	41.6485	-0.8895	205	00:00:46	279.0	52.8	15	1	1.0
15	2021-07-01 09:49:50	41.6485	-0.8897	220	00:00:47	280.0	41.7	12	1	0.0
16	2021-07-01 09:49:51	41.6485	-0.8898	232	00:00:48	280.0	37.8	21	2	2.0
17	2021-07-01 09:49:53	41.6485	-0.8901	253	00:00:50	282.0	35.3	20	2	-1.0
18	2021-07-01 09:49:55	41.6485	-0.8903	272	00:00:52	281.0	32.0	18	2	-3.0
19	2021-07-01 09:49:57	41.6485	-0.8905	290	00:00:54	278.0	32.7	18	2	-1.0
20	2021-07-01 09:49:59	41.6485	-0.8907	308	00:00:56	277.0	38.3	11	1	-1.0
21	2021-07-01 09:50:00	41.6485	-0.8909	319	00:00:57	276.0	43.7	12	1	-2.0

Anexo C: Gráficos de datos tomados

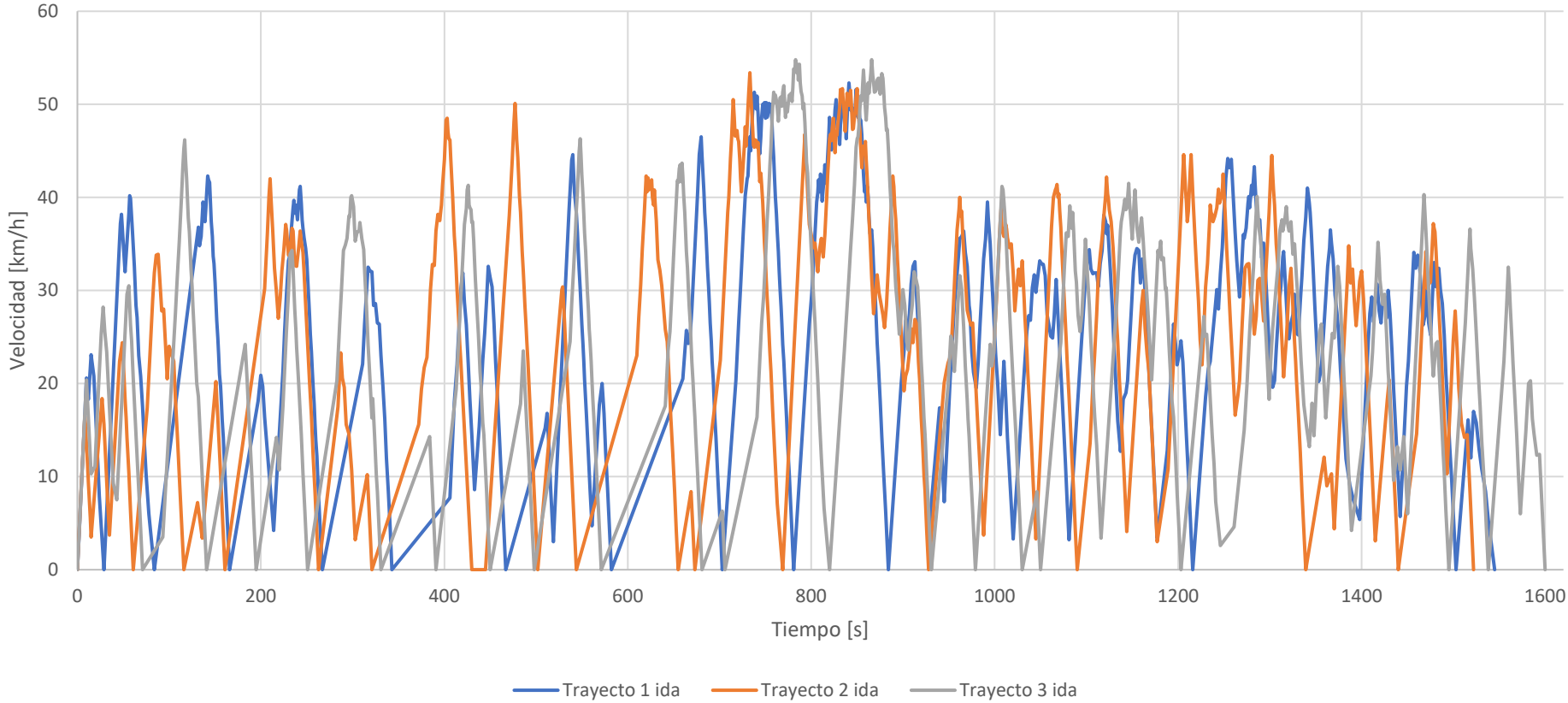


Gráfico C.1- Velocidad vs tiempo de diversos trayectos de ida de la ruta 41. Fuente: Elaboración propia

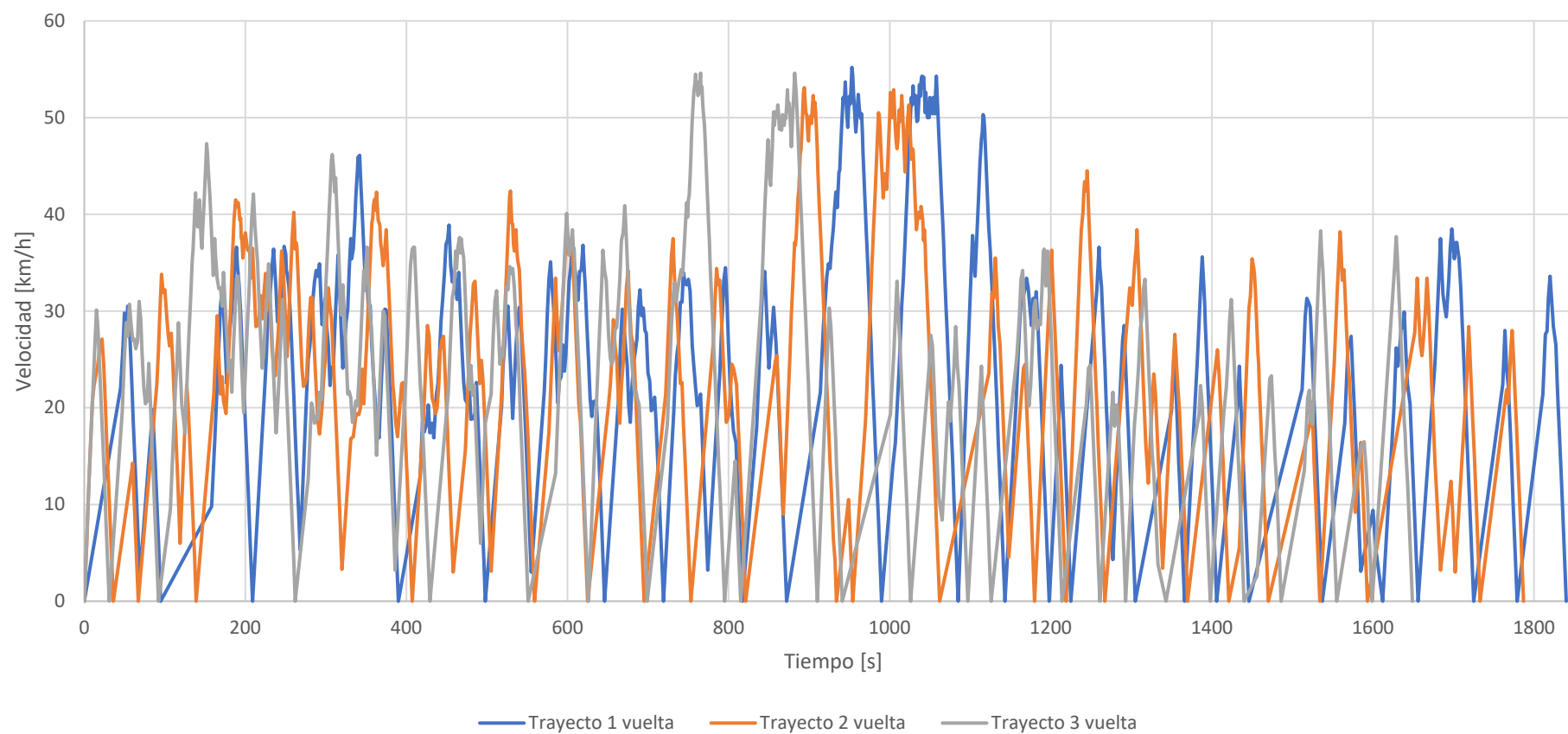


Gráfico C.2.- Velocidad vs tiempo de diversas trayectorias de vuelta de la ruta 41. Fuente: Elaboración propia

Anexo D: Descripción y diagrama de flujo de fuerzas simuladas

Fuerza de rodadura (F_{roz})

En este bloque se desarrollan las ecuaciones (ec. 3.11) y la (ec. 3.13). Se describen en la Figura D.1.

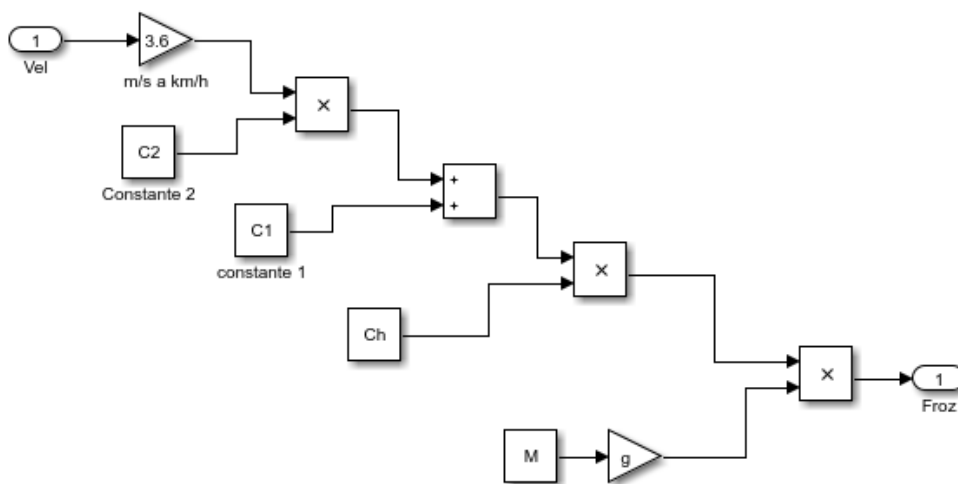


Figura D.1.- Bloque para el cálculo de la fuerza de rodadura (F_{roz})

Fuerza aerodinámica (F_{ae})

En este bloque se desarrolla la ecuación (ec. 3.10). Su diagrama de flujo implementado en Simulink se puede ver en la figura D.2

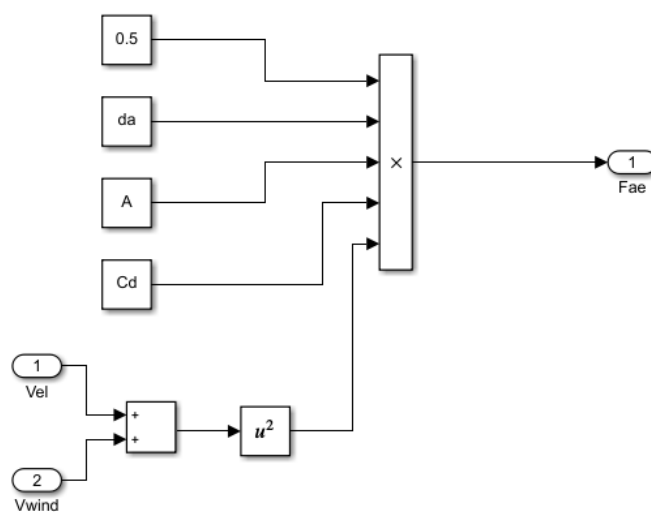


Figura D.2.- Bloque para el cálculo de la fuerza aerodinámica (F_{ae})

Fuerza de ascensión ($F_{ascensión}$)

En este bloque se desarrolla la ecuación (ec. 3.7)

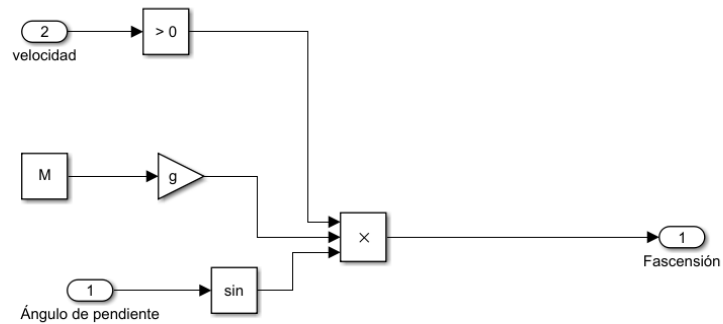


Figura D.3.- Bloque para el cálculo de la fuerza de ascensión ($F_{ascensión}$)

Para este bloque, además de la ecuación (ec. 3.7) se ha añadido la condición extra de que tiene que estar en movimiento para que la fuerza de ascensión surja efecto. De esta forma se indica que cuando el autobús está parado, el motor no tiene que ejercer fuerza para vencer la fuerza de ascensión, ya que esa fuerza la suplen los frenos.

Fuerza aceleración lineal y freno regenerativo ($F_{ac.lineal}$)

En este bloque se desarrolla la ecuación (ec. 3.14) y el funcionamiento del frenado regenerativo descrito en el Apartado 3.6.

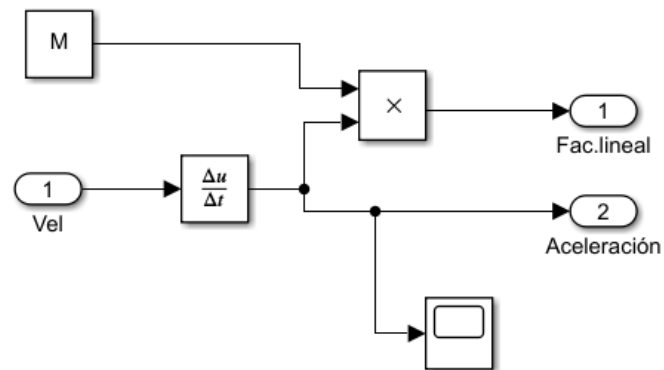


Figura D.4.- Bloque para el cálculo de la fuerza de aceleración lineal ($F_{ac.lineal}$)

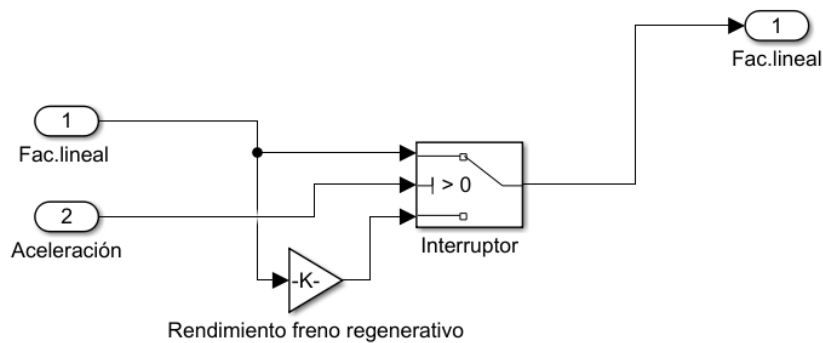


Figura D.5.- Bloque para el cálculo de la fuerza de aceleración lineal con freno regenerativo

Para simular el freno regenerativo descrito en el Apartado 3.6, se ha empleado un interruptor. Este interruptor deja pasar la fuerza de aceleración lineal sin modificar cuando la aceleración es positiva y cuando es negativa, se aplica el factor de rendimiento del freno regenerativo (Apartado 3.6) para simular la recuperación energética que tiene el motor al realizar el frenado.

Fuerza de aceleración angular ($F_{ac.angular}$)

En este bloque se desarrolla la ecuación (ec. 3.17)

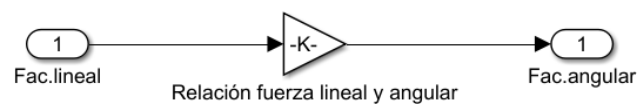


Figura D.6.- Detalle del bloque para el cálculo de la fuerza de aceleración angular ($F_{ac.angular}$)

Anexo E: Tipos de motores

Motor DC-Brushed

En este motor, el devanado de cobre se encuentra en el estator, el cual es excitado mediante corriente continua. Además, para conseguir llevar la corriente hasta el devanado se utilizan escobillas, normalmente de grafito que hacen contacto con unos anillos unidos al rotor. En el estator hay imanes permanentes que permiten que cuando comienza a circular corriente se mueva el rotor. La Figura E.1 muestra una vista de corte de este tipo de motores.

Las ventajas de este tipo de motor son escasas, debido a que, es el motor más antiguo de los que se van a nombrar.

- Muy buenas características de potencia y par.
- Controles de velocidad sencillos.

En cuanto a las desventajas.

- La densidad de potencia y par es muy pobre.
- Tiene una eficiencia muy baja para un motor eléctrico.
- Es voluminoso.
- Al usar escobillas y anillos para el contacto y el paso de la corriente, estos se desgastan lo que hace desprender un polvo conductor. Lo que aumenta el mantenimiento.
- El bobinado del rotor puede limitar la velocidad de giro.

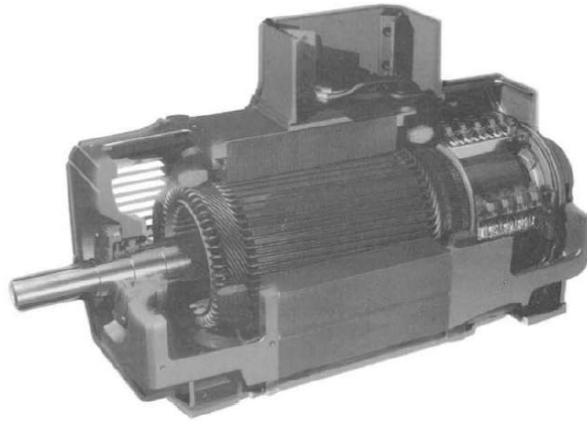


Figura E.1.- Vista de corte de un motor DC-Brushed Fuente: [44]

Motor de inducción

Este motor (Figura E.2) funciona mediante corriente alterna. El devanado de cobre se encuentra en el estator. Para poder funcionar mediante corriente alterna los polos del estator van alternados. El campo de excitación del rotor en este tipo de motor es de corriente alterna que es lo que lo diferencia de los motores síncronos. En este caso el rotor no tiene imanes, si no que tiene otro devanado de cobre o aluminio que permite que, al pasar corriente por el devanado del estator, el rotor se mueva mediante inducción.

Ventajas de este tipo de motor:

- Algunas marcas comerciales de vehículos eléctricos (p.ej. Tesla) utilizan este tipo de motores.
- No tiene imanes, por lo que puede funcionar a temperaturas elevadas.
- Al no tener imanes es más barato que los motores de imanes permanentes.
- Es muy robusto
- Materiales reciclables.
- Presenta un par, potencia y ruido similares a los motores de imanes permanentes.

La principal desventaja de este motor es que tiene una menor eficacia que los motores de imanes permanentes a baja velocidad.

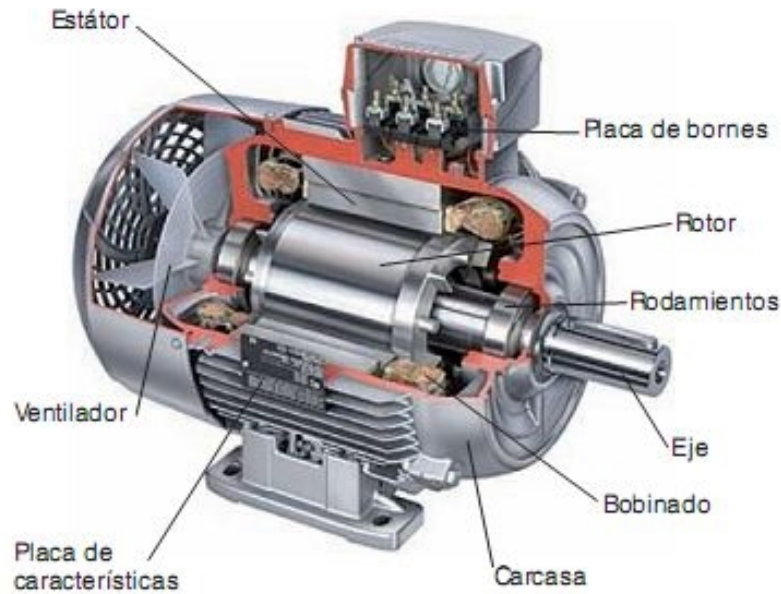


Figura E.2.- Vista de corte de un motor de inducción Fuente: [45]

Motor de imanes permanentes

Este tipo de motor tiene la característica principal de ser una máquina síncrona, al cual le han cambiado uno de los devanados por imanes permanentes. Hay 2 tipos fundamentales para motores de vehículos eléctricos

- AC-Brushless (motor de imanes permanentes de corriente alterna sin escobillas)
- DC-Brushless (motor de imanes permanentes de corriente continua sin escobillas)

La principal diferencia entre ellos es que en el AC-Brushless la parte reemplazada por imanes es el estator, mientras que en los DC-Brushless es el rotor. Por otra parte, los DC-Brushless tienen un control similar a los motores de corriente continua por lo que son muy simples y fáciles de controlar. Para los AC-Brushless hay que implementar un control mediante PWM¹.

Las principales ventajas de este tipo de motores son:

- Tienen un elevado rendimiento con una alta densidad de potencia.
- Dimensiones y peso reducido.

Sus desventajas son:

- Las pérdidas en el estator pueden ser importantes si las velocidades son muy altas.
- Para frecuencias elevadas se necesita un control muy preciso.
- A velocidades elevadas hay riesgo de desmagnetización.
- Dependencia de las tierras raras.

Motor de reluctancia conmutado

Este tipo de motores consiste en orientar un material ferromagnético, el cual es el rotor del motor, que sufre al verse sometido a un campo magnético. Este rotor trata de orientarse de tal forma que la reluctancia sea mínima con el campo magnético en movimiento.

¹ PWM: Modulación por Ancho de Pulsos

Las ventajas de este tipo de motores son:

- Construcción simple y robusta.
- Control sencillo.
- Excelentes características par-velocidad.
- Potencia constante durante un amplio rango de par-velocidad.
- Par elevado a baja velocidad.

Su principal desventaja es que produce un ruido y unas vibraciones inusuales para ser un motor eléctrico [46].

Anexo F: Clasificación de baterías

La diversidad en los tipos de batería se corresponde con las diferentes reacciones electroquímicas que pueden generarse dependiendo del cátodo y del ánodo del que esté constituida la batería. Además de las reacciones electroquímicas, los distintos tipos disponen de otra serie de características que las hacen más o menos adecuadas según la aplicación que se les dé. A continuación, se exponen los tipos existentes actualmente en el mercado y sus características principales.

Baterías plomo-ácido

Las baterías de plomo-ácido han sido un artículo indispensable para multitud de dispositivos electrónicos. Los coches de combustión convencionales siguen llevando estas baterías para su sistema de arranque. Esto es debido principalmente a que son la opción más barata para almacenar energía mientras que sigue dando unas características y un tiempo de vida aceptables. La Tabla 8.1 recoge sus principales características.

Tabla F.1.- Características de baterías Pb-Ácido. Fuente: [47]

Característica	Valor
Eficiencia [%]	70
Voltaje de celda [V]	2
Nº de ciclos de vida	50-500
Densidad de gravimétrica [Wh/kg]	30-40
Densidad volumétrica [Wh/L]	50-150
Autodescarga [%/mes]	2-7,5

Ventajas de este tipo de baterías comparadas con otros tipos:

- Coste muy reducido debido a su popularidad y a la madurez de su producción.
- Disponible en muchas formas y tamaños pudiendo ir desde 1Ah hasta varios cientos de Ah.

- Buen rendimiento a altas velocidades de descarga.
- Rendimiento moderadamente bueno para bajas y altas temperaturas.
- Fácil indicación del estado de carga.
- Retención de carga para aplicaciones de carga intermitente.
- Se puede conseguir con diseños que no requieran mantenimiento.
- Celdas fácilmente reciclables.

Desventajas de este tipo de baterías:

- Bajo número de ciclos.
- Densidad gravimétrica baja.
- Si permanece mucho tiempo almacenada se puede descargar, llegando incluso a un estado irreversible de polarización de los electrodos (sulfatación).
- Difícil diseño para tamaños pequeños.
- En algunos diseños la acumulación del hidrógeno puede generar problemas de explosión.
- Por un diseño incorrecto se puede llegar a producir una fuga térmica.
- Dependiendo del diseño se puede llegar a generar corrosión.

Baterías Ni-Cd

Este tipo de baterías utiliza un ánodo de cadmio y un cátodo de hidróxido de níquel, con hidróxido de potasio como electrolito. Se utilizan, tanto en el ámbito doméstico como en el industrial. Cada vez se va reduciendo su uso debido a su efecto memoria y al cadmio, que es un material altamente contaminante. La Tabla 8.2 describe sus principales características.

Tabla F.2.- Características de baterías Ni-Cd. Fuente: [47]

Características	Valor
Eficiencia [%]	70-90
Voltaje de celda [V]	1,2
Nº de ciclos de vida	1000-2000
Densidad de gravimétrica [Wh/kg]	40-60
Densidad volumétrica [Wh/L]	50-150
Autodescarga [%/mes]	10

Ventajas presentes en este tipo de baterías:

- Ciclo de vida muy elevado.
- Pueden soportar abusos eléctricos y físicos sin dejar de funcionar, son muy robustas.
- No pueden sufrir fallo repentino.
- Bajo mantenimiento.
- Permite carga ultrarrápida con poco estrés.
- Excelente vida útil.
- Almacenamiento y transporte simple, sin reglamento especial aplicado.
- Amplia gama de tamaños y opciones de rendimiento.

Desventajas de este tipo de baterías:

- Baja densidad de energía.
- Coste más alto que las baterías plomo-ácido.

- Contiene cadmio, el cual es un metal tóxico.
- Alta autodescarga.
- Por su baja resistencia interna no se puede cargar a tensión constante, ya que genera corrientes muy elevadas.

Baterías Níquel-Metal hidruro

Es un tipo de batería recargable que utiliza un ánodo de oxihidróxido de níquel, mientras el cátodo es de una aleación de hidruro metálico.

La comparación directa de este tipo de baterías son las de Ni-Cd, con las cuales presentan varias diferencias. Una de ellas es que esta batería no lleva cadmio por lo que no contiene metales tóxicos, además este tipo de batería no sufre tanto el efecto memoria que tanto se notaba en las baterías Ni-Cd.[47]

Tabla F.3.- Características de baterías Ni-MH. Fuente: [47]

Características	Valor
Eficiencia [%]	70
Voltaje de celda [V]	1,2
Nº de ciclos de vida	500-1000
Densidad de gravimétrica [Wh/kg]	75-100
Densidad volumétrica [Wh/L]	140-300
Autodescarga [%/mes]	30

Las ventajas de este tipo de baterías son:

- Mayor densidad gravimétrica que las baterías Ni-Cd.
- Su construcción es muy hermética y no requiere mantenimiento.
- No contienen cadmio.
- Capacidad de carga rápida.
- El contenido de níquel hace rentable el reciclaje.

Las desventajas que presenta son:

- La eficiencia general no es tan buena como las baterías de Ni-Cd.
- Presentan una elevada autodescarga.
- Efecto memoria moderado.
- Coste elevado del ánodo.
- No permite la sobrecarga.
- A temperaturas bajas, el potencial se ve reducido drásticamente.

Ion-litio

Son dispositivos que suelen usar carbonato de litio o hidróxido de litio en lugar de litio metálico. Se han convertido en las más utilizadas para pequeños dispositivos electrónicos, en gran medida debido a su alta densidad energética, acumuladores pequeños y ligeros con elevada unidad de carga y con un mínimo efecto memoria; es decir, permiten múltiples cargas y descargas sin verse afectado el rendimiento del acumulador.

Hay muchas combinaciones de baterías con litio, algunos ejemplos son:

- Litio y óxido de cobalto (LCO)
 - o Cátodo: LiCoO_2
 - o Ánodo: Grafito
 - o Características: Tienen una energía específica muy elevada y son usadas principalmente para móviles.
- Óxido de litio-manganeso (LMO)
 - o Cátodo: LiMn_2O_4
 - o Ánodo: Grafito
 - o Características: Destacan por su estabilidad a altas temperaturas, además son más seguras que el resto de los tipos de baterías de ion-litio. Se usan principalmente en ordenadores y vehículos eléctricos.
- Litio fosfato de hierro (LFP)
 - o Cátodo: LiFePO_4
 - o Ánodo: Grafito
 - o Características: Poseen una alta seguridad y estabilidad térmica, También son duraderas y tienen un largo ciclo de vida. Su uso principal actual es para motocicletas eléctricas.
- Litio níquel manganeso óxido de cobalto (NMC)
 - o Cátodo: LiNiMnCoO_2
 - o Ánodo: Grafito
 - o Curiosidades: Tienen una alta capacidad y potencia específica. Se usan para herramientas eléctricas y para baterías de vehículos eléctricos.
- Litio níquel cobalto óxido de aluminio (NCA)
 - o Cátodo: LiNiCoAlO_2
 - o Ánodo: Grafito
 - o Características: Poseen una potencia específica elevada, pero una potencia limitada. Se usan para aparatos médicos y baterías de vehículos eléctricos.
- Titanato de litio (LTO)
 - o Cátodo: LiMnO_2 o LiNiMnCoO_2
 - o Ánodo: $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$
 - o Características: Número de ciclos de vida muy elevada, además permite la carga rápida y funciona en un rango de temperaturas muy amplio. Pero tiene baja potencia específica. Se usan para vehículos eléctricos.

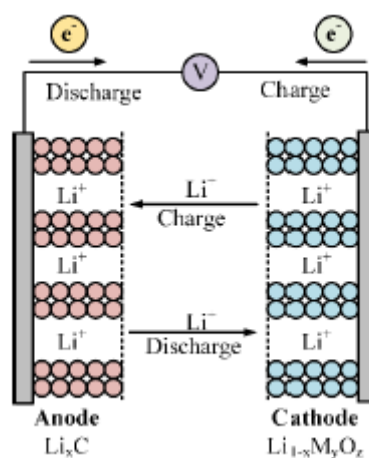


Figura F.1.- Carga y descarga de una batería típica de litio. Fuente: [48]

El proceso de carga de esta batería se realiza cuando aparece un diferencial de potencial eléctrico entre ambos polos de la batería. Una vez ocurre esto los iones de litio se desprenden del electrodo positivo y se trasladan al negativo. A la vez los electrones realizan el mismo movimiento, pero por un circuito diferente.

Cuando los electrones llegan al grafito se recombinan con los electrones y el grafito quedándose en el ánodo. En estado de carga, los iones de litio se quedan almacenados en las capas de grafito.

El proceso de descarga es inverso, los iones se desprenden del ánodo y van hacia el cátodo por el diferencial eléctrico creado por la necesidad del usuario. Al igual que pasaba en la carga, los electrones recorren otro circuito independiente que permite que se genere una corriente eléctrica. Sus principales características se recogen en la Tabla 8.4.

Tabla F.4.- Características de baterías Ion-Litio. Fuente: [47], [48]

Características	Valor
Eficiencia [%]	80-90
Voltaje de celda [V]	2,4-3,7
Nº de ciclos de vida	500-7000
Densidad de gravimétrica [Wh/kg]	50-260
Densidad volumétrica [Wh/L]	250-730
Autodescarga [%/mes]	8-31

Las ventajas de este tipo de baterías son amplias:

- Tienen un alto voltaje de celda.
- Elevada densidad de energía que permite acumular grandes cantidades de energía por tamaño y peso.
- Permite tasas de descarga de hasta 40C, lo que las hace ideales para vehículos eléctricos.
- Tensión prácticamente constante hasta el 80% del SOC.
- Alta eficiencia.
- Elevado número de ciclos de vida.
- No presenta efecto memoria.

Desventajas de este tipo de baterías:

- Baterías muy caras.
- Reducción del rendimiento a bajas temperaturas.
- Necesitan de un sistema de alimentación.
- Necesidad de protecciones contra temperatura.
- Transporte muy restrictivo y exigente.
- En caso de ruptura puede emitir gases e inflamarse.
- Si la tensión de celda cae por debajo de 2V pueden sufrir una degradación permanente.
- Determinar el estado de carga es complicado debido a la baja variedad de la tensión de celda.

Al ser estas baterías las más usadas en vehículos eléctricos se va a hacer hincapié en este tipo de baterías para una posterior comparación. Sus principales características se recogen en la Tabla 8.5.

Tabla F.5.- Tabla de datos de variaciones de batería de ion-litio. Fuente: [48]

Tipo de batería de litio	Voltaje [V]	Densidad gravimétrica [Wh/kg]	Nº ciclos de vida	Fallo térmico [°C]
LCO	3,6	150-200	500-1000	150
LMO	3,7	100-150	300-700	250
NMC	3,6	150-220	1000-2000	210
LFP	3,2	90-120	1000-2000	270
NCA	3,6	200-260	500	150
LTO	2,4	50-80	3000-7000	-

Baterías metal-aire

Son un tipo de baterías cuyos electrodos son el “combustible” de estas baterías, por lo que se necesita la sustitución de los electrodos metálicos por otros nuevos, existiendo la posibilidad del reciclado de estos, y así poder volver a utilizarlos.

Dependiendo del metal utilizado como ánodo la batería tiene unas características u otras. Estas baterías siguen estando en proceso de investigación y todavía no se sabe a ciencia cierta el alcance que tendrán. Los metales más comunes para estas baterías se recogen en la Tabla 8.6 y la Tabla 8.7: [49]

- Zinc-Aire

Tabla F.6.- Características baterías Zinc-Aire

Características	Valor
Voltaje de celda [V]	1-1,2
Nº de ciclos de vida	>2000
Densidad de gravimétrica teórica [Wh/kg]	400
Densidad volumétrica [Wh/L]	270
Autodescarga [%/mes]	Tan alta como electrolito quede

- Aluminio-Aire

Tabla F.7.- Características baterías Aluminio-Aire

Características	Valor
Voltaje de celda [V]	1,4
Nº de ciclos de vida	>1000
Densidad de gravimétrica teórica [Wh/kg]	225
Densidad volumétrica [Wh/L]	195
Autodescarga [%/mes]	10

Las ventajas generales de este tipo de baterías son:

- Alta densidad gravimétrica.
- Voltaje de descarga constante.
- Largo periodo de vida.
- No tiene ningún problema relacionado con la ecología.

- Bajo coste, debido a que usa solo metales.

Las desventajas que presentan son:

- Limitada voltaje de celda.
- Temperatura de operación limitada.
- Expulsa H_2 cuando se corroe el ánodo.
- Se puede producir la carbonización del electrolito.