



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

**Análisis, ensayo y mejora de un sistema para la monitorización de la autonomía en vehículos eléctricos para el reparto urbano de mercancías.**

Analysis, testing and improvement of a system for monitoring autonomy in electric vehicles for the urban freight distribution.

Autor

***Víctor Villacampa McDonough***

Director/es

Emilio Larrodé Pellicer

Juan Bautista Arroyo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2022/23



## RESUMEN

---

En el presente trabajo se enfoca en un modelo que permite calcular el consumo de un vehículo eléctrico. El funcionamiento de dicho modelo se comprueba mediante ensayos y a través de los resultados de los ensayos se mejora el modelo de cálculo de consumo.

A partir de este modelo de cálculo se construye un sistema capaz de predecir el consumo de un vehículo en una determinada ruta.

Se realiza en primer lugar un estudio en relación con los vehículos eléctricos y sobre actuales estudios de sistemas capaces de predecir el consumo de vehículos eléctricos de manera precisa.

Posteriormente se detalla el modelo de cálculo de consumo y cómo se trabaja con este durante el transcurso del presente trabajo. Detallando el funcionamiento del modelo de cálculo, la manera de estudiar el mismo y los cambios efectuados.

Seguidamente se detalla el modelo de predicción de consumo, se describe el funcionamiento del modelo de predicción y la forma de estudiarlo.

Una vez descrita la forma de trabajar y los objetos de estudio, se explica en profundidad los ensayos llevados a cabo. Resaltando el diseño de dichos ensayos, el equipamiento y las herramientas utilizadas, los datos recogidos, detallando el análisis de los datos y finalmente aportando los resultados de dichos ensayos.

Finalmente se llega a las conclusiones pertinentes, las cuales son presentadas al final del trabajo.

Sendos modelos (modelo de cálculo y modelo de predicción) son desarrollados en Matlab.

Los ensayos se llevan a cabo con la ayuda de dos vehículos eléctricos propiedad de la Universidad de Zaragoza y dentro del recinto de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza.



# ÍNDICE.

---

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
1.1. CONTEXTO .....	8
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	8
1.3. OBJETIVOS .....	9
1.4. ALCANCE.....	9
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>11</b>
2.1. AUTONOMÍA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO .....	11
2.2. ANTECEDENTES EN LA PREDICCIÓN DE LA AUTONOMÍA .....	12
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>14</b>
3.1. MODELO DE CÁLCULO DE CONSUMO .....	14
3.1.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO .....	14
3.1.2. MEDIDA EXPERIMENTAL DEL CONSUMO.....	14
3.1.3. ENSAYOS Y SU EVOLUCIÓN.....	15
3.1.4. ESTUDIO DE COMPARACIÓN DE CONSUMO MEDIDO Y CONSUMO CALCULADO .....	16
3.1.5. CAMBIOS EN EL MODELO DE CÁLCULO DE CONSUMO .....	17
3.2. PREDICCIÓN DEL CONSUMO .....	18
3.2.1. MODELO DE PREDICCIÓN.....	18
3.2.2. CONSUMO PREDICHO.....	19
3.2.3. ENSAYOS PARA COMPROBAR EL MODELO DE PREDICCIÓN .....	19
3.2.4. ESTUDIO DE LOS ENSAYOS DEL MODELO DE PREDICCIÓN .....	20
<b>4. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>21</b>
<b>5. ENSAYOS.....</b>	<b>24</b>
5.1. INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPAMIENTO.....	24
5.2. PROTOCOLO DE ENSAYOS .....	27
5.3. ESCENARIOS DE CONDUCCIÓN .....	28
5.4. RESUMEN DE ENSAYOS.....	29
<b>6. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....</b>	<b>31</b>
6.1. FINALIDAD Y TRANCURSO DE LOS ENSAYOS.....	31
6.2. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE ENSAYOS .....	31

6.3. RESULTADOS .....	45
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>47</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA. ....</b>	<b>48</b>
<b>ANEXO A. DATOS FIJADOS.....</b>	<b>50</b>
A.1. DATOS DE LOS VEHÍCULOS .....	50
A.2. VALOR DE LOS PARÁMETROS GENERALES .....	51
<b>ANEXO B. ENSAYOS .....</b>	<b>52</b>
B.1.RUTAS .....	52
B.1.1. RUTA PRINCIPAL .....	52
B.1.2. RUTA DE RECTA .....	57
B.1.3. RUTA DE GIROS .....	57
B.1.4. RUTA DE VELOCIDADES.....	58
B.2. MEDICIONES BATERÍA.....	58
<b>ANEXO C. MODIFICACIÓN EN CUANTO AL RENDIMIENTO DEL MOTOR EN EL MODELO DE CÁLCULO DE CONSUMO .....</b>	<b>63</b>
C.1 MÉTODO DE TRABAJO .....	63
C.2 CÓDIGO IMPLEMENTADO .....	63



## **1. INTRODUCCIÓN**

### ***1.1. CONTEXTO***

En la actualidad la notable preocupación por el medio ambiente y la dependencia de los combustibles fósiles está traducándose en profundos cambios de la sociedad actual. Entre ellos la forma de generar energía y de transportarnos, evolucionando hacia una forma más ecológicamente sostenible.

Uno de los sectores con mayor peso en la emisión de gases de efecto invernadero es el del transporte. Es clave, por tanto, reducir de manera progresiva las emisiones en este sector.

Y la realidad así lo refleja, el número de coches eléctricos es cada vez mayor. Tomando como ejemplo la Unión Europea, las ventas de estos vehículos están teniendo un aumento de manera exponencial, así como también está viéndose incrementado el uso de energías renovables para el transporte en Europa [1]. La evolución ha sido notable en la última década, se ha pasado de únicamente tener 600 vehículos eléctricos de nueva matriculación en el año 2010 a cerca de 1.061.000 unidades en 2020 (siendo estos el 11% de las nuevas matriculaciones). Y estos datos han aumentado todavía más, siendo los vehículos eléctricos en 2021 el 18 % de todas las nuevas matriculaciones.

Uno de los mayores puntos débiles actualmente del vehículo eléctrico es su autonomía, así como también los problemas asociados a la carga. El número de puntos de carga, si bien está en aumento, es reducido y el tiempo que se tarda en realizar una carga es elevado. Y la autonomía de los vehículos eléctricos en comparación con los de combustión interna es notablemente menor. Es por ello, que estos dos aspectos son de los más importantes a mejorar.

### ***1.2. JUSTIFICACIÓN***

Una de las principales problemáticas desde el punto de vista del usuario de un vehículo eléctrico es la preocupación marcada del conductor por la autonomía de este una vez ya en marcha. Esta preocupación, como es lógico, crece de manera proporcional con el tiempo de uso desde la última carga.

Además, es cada vez más común que vehículos como furgonetas de reparto se queden sin batería sin haber finalizado la totalidad de los repartos. Esto supone una pérdida económica a la empresa no sólo por los repartos que se han quedado sin repartir, sino también por el tener que recoger y retirar ese vehículo (en el caso de un vehículo convencional se podría ir a la gasolinera más cercana y comprar una garrafa de gasolina). Esto también ocurre con autobuses, debido a una mala precisión en el cálculo de autonomía, estos se pueden quedar sin batería en mitad de la ruta.

He ahí la necesidad de una herramienta que ayude al usuario a reducir esa ansiedad y a mejorar la experiencia de la conducción de un vehículo eléctrico. Así como también para evitar que vehículos que se encargan del reparto de mercancías o pasajeros se queden sin batería en mitad de la ruta.



### **1.3. OBJETIVOS**

El presente trabajo tiene como objetivo el monitorizar, comprobar y perfeccionar un sistema capaz de calcular el gasto energético de un vehículo eléctrico. Este sistema o modelo de cálculo es uno ya existente, el cual se ha construido a través del software Matlab.

Este modelo está más enfocado para el uso en furgonetas de reparto o autobuses, y no tanto para un particular, si bien su uso será positivo para cualquiera de los casos.

Otro de los objetivos es hacer frente a la incertidumbre en cuanto a si se tiene la energía necesaria en la batería para llevar a cabo una determinada ruta. Es por ello por lo que se busca añadir a este modelo (una vez verificado y perfeccionado) una función predictora de consumo.

Esta incorporación debe ser capaz de predecir el consumo de una determinada ruta de manera precisa.

Con esto se busca tener un modelo preciso en cuanto al cálculo y predicción de consumo a partir del cual se puedan llevar a cabo futuros trabajos de mejora y perfección de este.

### **1.4. ALCANCE**

En el presente trabajo, en primer lugar, se va a abordar la comprobación del correcto funcionamiento de un sistema capaz de calcular el gasto energético de un vehículo.

Para esta primera parte de comprobación, se va a realizar una serie de ensayos con el fin de validar que dicho sistema de cálculo energético, sustentado en su base teórica, sea acorde a la realidad.

Para llevar a cabo dichos ensayos se van a diseñar cuatro rutas distintas, cada una con una finalidad. Además de esto, se va a hacer uso de dos vehículos eléctricos distintos. Estos dos vehículos son el “Zylog” con una potencia de 3,8 kW y el “Zero” de 145 kW (detallados en el Anexo A).

En cada uno de los ensayos se va a estudiar la influencia de un determinado parámetro. De esta manera se van a eliminar las mayores fuentes de error en referencia al sistema de cálculo energético. Por tanto, cada vez que se descubre una fuente de error este sistema va a ser ajustado y se va a describir el cambio efectuado.

Una vez se tiene esta primera parte concluida, se va a implementar en dicho sistema un recurso adicional. Siendo este recurso el de predicción de consumo.

En primer lugar, se va a diseñar y describir el funcionamiento de un sistema predictor de gasto energético de una determinada ruta. Y posteriormente se va a ensayar este sistema con el fin de comprobar que dicho sistema predice el gasto energético a través de una determinada ruta de manera precisa.

Para los ensayos de esta segunda parte se va a diseñar una única ruta y se va a hacer uso de un solo vehículo (siendo este uno de los dos que se va a utilizar en la primera parte).

Finalmente, con la segunda parte concluida se va a proceder a la discusión de los resultados obtenidos en el presente trabajo y a la propuesta de líneas futuras de investigación, así como también posibles mejoras.

Cabe destacar que durante todo el desarrollo del presente trabajo hay una serie de factores que quedan al margen en cuanto al cálculo energético se refiere:

- El gasto energético va a ser la energía necesaria para mover el vehículo por lo que los gastos energéticos auxiliares de un vehículo (como pueden ser la radio o el aire acondicionado) no van a ser objeto de estudio.
- El estado de las baterías y su influencia en el consumo quedan también fuera de estudio del presente trabajo.
- La influencia de factores meteorológicos (lluvia, viento, altas y bajas temperaturas, ...) tampoco van a ser objeto de estudio y por lo tanto quedan fuera.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. AUTONOMÍA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

El rango de autonomía de los vehículos eléctricos mejora año a año, pero todavía junto con los puestos de carga es uno de los factores más limitantes del mismo.

A continuación, se muestra una tabla resumen obtenida a partir de datos de más de 100 vehículos eléctricos [2]:

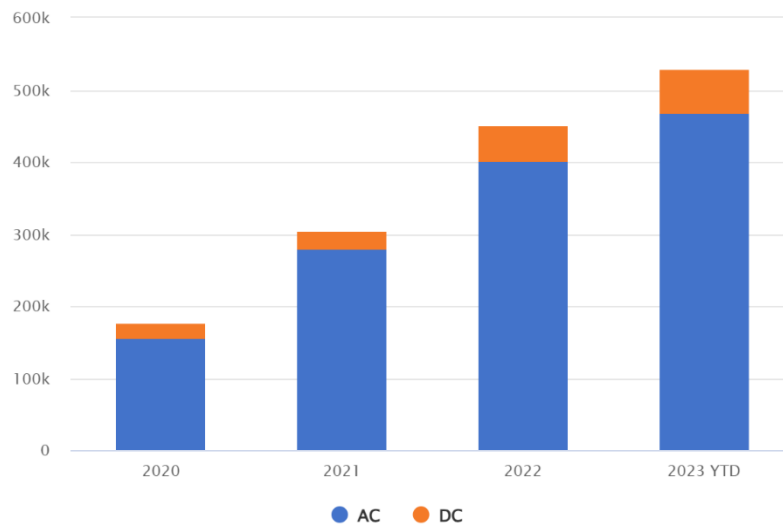
	<i>Promedio</i>	<i>Máximo</i>
<i>Autonomía [km]</i>	<i>369,46</i>	<i>685</i>
<i>Tamaño de batería [kWh]</i>	<i>76,07</i>	<i>118</i>
<i>Carga rápida [km/h]</i>	<i>601,43</i>	<i>1290</i>
<i>Precio [€]</i>	<i>65.795</i>	<i>400</i>

*Tabla 1. Tabla resumen.*

Los datos de autonomía que aporta cada fabricante son datos en condiciones idóneas y que se alejan bastante de la realidad. Estas autonomías son calculadas en un laboratorio. Se realiza una prueba en un banco de ruedas donde se simula un recorrido, el cual está estandarizado (se trata del ciclo WLTP). De esta manera no se tiene en cuenta ciertos factores que afectan a la autonomía, como son los aspectos ambientales, el tráfico, la pendiente, el estado de la batería (los datos de autonomía son de una batería sana y nueva), etc.

En cuanto a los puntos de carga se refiere, actualmente en la Unión Europea se cuentan con más de 500.000 puntos de carga [3] (entre públicos y privados) y se estima una inversión de 280 billones de euros [4] solo en la UE en todo lo que respecta a la instalación de puestos de recarga, mejora de la red eléctrica y aumento de la capacidad de generación de las energías renovables. Todo esto es fruto del “EV Charging Masterplan for EU-27”, donde en el sector del transporte se ha fijado una reducción en un 55% de las emisiones del CO<sub>2</sub> para 2030 con respecto a las emisiones de 1990.

En la figura 1 se puede observar la evolución de los puestos de recarga en la UE en los últimos años, donde se hace la diferenciación entre los que son de corriente continua y alterna.



*Figura 1. Evolución de puestos de recarga en la UE. Fuente: [3]*

## **2.2. ANTECEDENTES EN LA PREDICCIÓN DE LA AUTONOMÍA**

La autonomía de un vehículo eléctrico es un factor muy importante, por lo tanto, una predicción en tiempo real de manera precisa cobra gran importancia. Existen numerosos estudios con diversos enfoques que buscan crear una herramienta que sea capaz de predecir de manera certera la autonomía restante del vehículo. Dicha predicción requiere de disponer de información detallada de la ruta que va a llevar a cabo el usuario.

A continuación, se detallan algunos de los diversos enfoques:

- **Modelos empíricos de predicción:** estos modelos basan la predicción en datos reales de conducción. A partir de un modelo que sea capaz de calcular el consumo aportándole toda la información necesaria (velocidad, pendiente, distancia, etc.) se puede predecir de manera precisa la futura conducción por una ruta establecida. En [5] abordan el tema de predicción a través de un modelo empírico. En este estudio se predice la velocidad que se va a llevar por un trayecto dado, a partir de información de límite de velocidad, tráfico, número de semáforos en el trayecto y las curvas.

Una forma más precisa todavía, sería tener información real del perfil de velocidades de vehículos que hayan realizado ese trayecto con anterioridad. De esta manera la predicción se realizaría con un perfil de velocidades mucho más cercano al que realmente tendrá lugar. Este podría ser el caso de autobuses o de furgonetas de reparto que realizan siempre los mismos recorridos o recorridos muy similares de un día a otro.

- Modelos basados en inteligencia artificial: a partir de técnicas de “machine learning” son capaces de predecir el consumo. Estos modelos tienen la ventaja de ser cada vez más precisos conforme se vaya recopilando más información. En [6] llevan a cabo un estudio con este enfoque donde consiguen mejorar la precisión de esta técnica en comparación con modelos anteriores.
- Modelos basados en estimación: se trata de los modelos actualmente en uso de predicción de energía restante y cuya precisión es notablemente inferior a los dos anteriormente nombrados. El cálculo de autonomía restante se obtiene dividiendo la energía que resta en la batería (kWh) entre la eficiencia media del vehículo (kWh/km).

Es de esperar que estos modelos con el paso del tiempo vayan aumentando en precisión, consiguiendo con ello facilitar la incorporación del vehículo eléctrico en la sociedad actual.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. MODELO DE CÁLCULO DE CONSUMO

##### 3.1.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO

El primer objetivo de este trabajo es el de comprobación y perfeccionamiento de un modelo de cálculo de consumo ya existente, este fue desarrollado en [7].

Este modelo de cálculo construido en Matlab [8] es capaz a partir de datos obtenidos por un GPS, calcular el consumo de un vehículo segundo a segundo. Este cálculo de consumo viene detallado en el marco teórico.

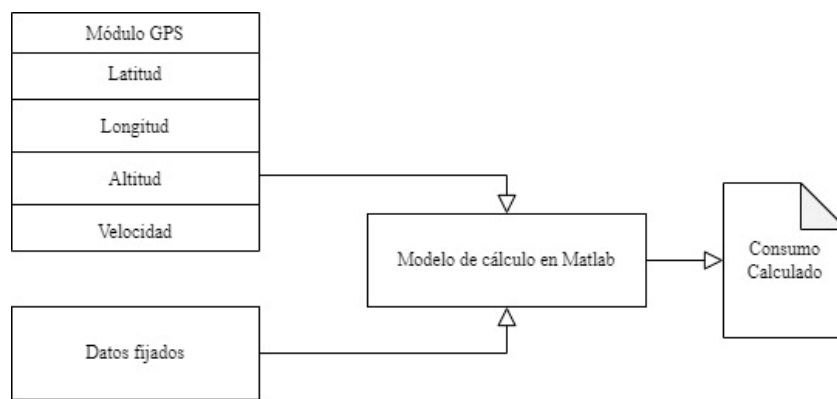


Figura 2. Modelo de cálculo de consumo.

Como se puede apreciar en la figura 2, el modelo necesita de dos entradas de información distintas, una donde los datos son variables (datos del GPS) y otra donde los datos son constantes (características del vehículo como el área frontal o diversos rendimientos, coeficientes como el coeficiente aerodinámico, ...). Los valores de estos datos constantes vienen discutidos en el Anexo A.

El resultado es el cálculo del consumo (la energía calculada que se nombra como  $E_{calculada}$ ).

##### 3.1.2. MEDIDA EXPERIMENTAL DEL CONSUMO

Para comprobar el correcto funcionamiento de dicho modelo de cálculo se comparan los datos de consumo calculado ( $E_{calculada}$ ) con los datos de consumo medido ( $E_{medida}$ ). Este consumo medido se obtiene a partir de la medición directa de la batería con un sistema de toma de datos de tensión e intensidad (se obtienen los valores de tensión e intensidad segundo a segundo).

El consumo medido es resultado de la siguiente ecuación

$$E_{medida} = \frac{U * I * T}{3600} \quad (1)$$

donde:

- $E_{medida}$ : Energía consumida [Wh]
- U: tensión en bornes de la batería [V]
- I: corriente en la batería [A]
- T: tiempo transcurrido [s]

### 3.1.3. ENSAYOS Y SU EVOLUCIÓN

Para poder realizar la comparación entre  $E_{calculada}$  y  $E_{medida}$  se llevan a cabo una serie de ensayos para tomar los datos necesarios. Y a partir de estos datos se comprueba el correcto funcionamiento del modelo de cálculo.

Estos ensayos se realizan con un vehículo eléctrico, en un determinado recorrido, para posteriormente realizar un estudio detallado con los datos recogidos del GPS y de la batería.

Durante el ensayo tanto los datos del GPS como los obtenidos de la batería son grabados en un archivo de texto.

Partiendo de la base de que el modelo original no es preciso y por tanto se ha de encontrar las fuentes de error, se presuponen estas posibles fuentes de error:

- Altitud: influencia de la precisión en la toma de datos del parámetro altitud.
- Aceleración: influencia de los cambios de velocidad.
- Velocidad angular: influencia de la cantidad de giros y del radio de curvatura.
- Batería: influencia del estado de la batería.
- Motor: influencia de la eficiencia del motor.

A partir de estas posibles fuentes de error se diseña una serie de recorridos con el objetivo de aislar y optimizar el estudio de dichas fuentes de error. Estas rutas vienen descritas en el apartado Ensayos y recogidas en el Anexo A.

A continuación, viene representada la evolución de dichos ensayos durante el transcurso del presente trabajo:

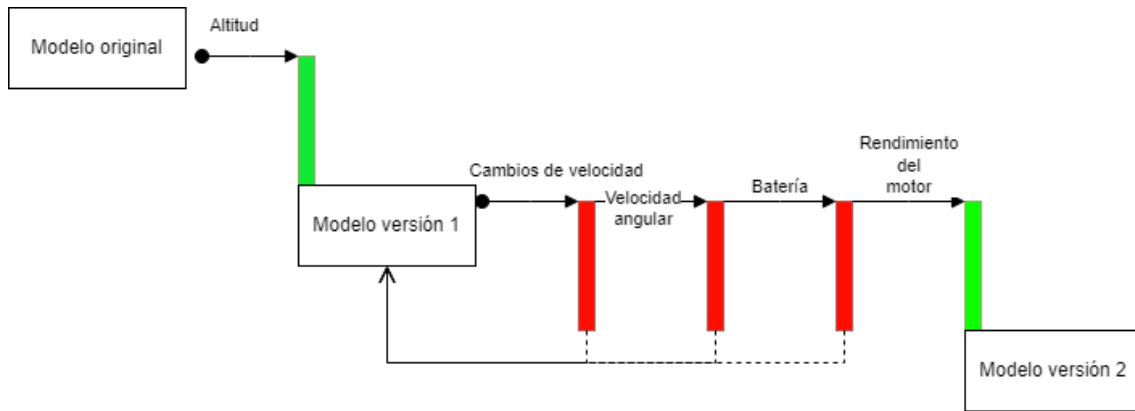


Figura 3. Evolución del modelo a través de los ensayos.

El color verde representa un ensayo en el que se descubre que el parámetro de estudio supone una fuente de error y en rojo aquel en el que no.

#### 3.1.4. ESTUDIO DE COMPARACIÓN DE CONSUMO MEDIDO Y CONSUMO CALCULADO

Una vez se tiene definidos los elementos a comparar y los parámetros objeto de estudio, se ensaya y a partir de los datos de cada ensayo se realiza un estudio.

Este estudio se lleva a cabo en Excel, se ha optado por esta herramienta por su facilidad de uso, su compatibilidad con otros formatos, su gran capacidad para manejar gran cantidad de datos, por conocimiento previo del autor de esta herramienta y por su gran repertorio de recursos gráficos que incluye.

En Excel se recrea el modelo de cálculo de Matlab para de esta manera poder realizar la comparación.

Esta comparación consiste en estudiar el error existente segundo a segundo entre el consumo medido ( $E_{medida}$ ) y el calculado ( $E_{calculada}$ ). A través de este estudio se puede observar donde se originan las mayores discrepancias, si el error es constante o variable, si tiene relación con un parámetro u otro, etc. Dicho estudio supone detallar cada segundo:

- Consumo medido.
- Consumo calculado.
- Energías involucradas.
- Cálculos de verificación, esto hace referencia a cálculos que se llevan a cabo para comprobar que los datos obtenidos por el GPS o de la batería son correctos. Por ejemplo, se calcula de manera separada la velocidad a partir de las coordenadas arrojadas por el GPS para compararlo posteriormente con la velocidad aportada por el GPS.
- Parámetros del vehículo, como es el caso del rendimiento del motor.



### 3.1.5. CAMBIOS EN EL MODELO DE CÁLCULO DE CONSUMO

Durante el transcurso de los ensayos se descubre que tanto el parámetro de altitud como el del rendimiento del motor son fuentes de error. A continuación, se detallan los cambios efectuados en el modelo de cálculo.

#### Altitud

Se ha comprobado que el valor de altitud arrojado por el GPS es poco preciso, además de estar equivocado (arroja unos datos de altitud que no son los reales). Por tanto, el cambio efectuado es el de cambiar la fuente del dato de altitud, pasando esta a ser el Instituto Geográfico Nacional [9].

#### Rendimiento del motor

El modelo inicial trabajaba con un valor del rendimiento del motor constante. Se ha observado que con un valor de rendimiento constante se comete un error considerable y por tanto se pasa a trabajar con un rendimiento variable, el cual depende de las prestaciones del motor en cada momento (par y rpm).

Para efectuar dicho cambio es necesario conocer el comportamiento del motor, cuando este trabaja como motor y como generador. A continuación, vienen representadas las curvas de eficiencia del motor del vehículo “Zero” [10] (vehículo del cual se tiene amplia información del comportamiento del motor).

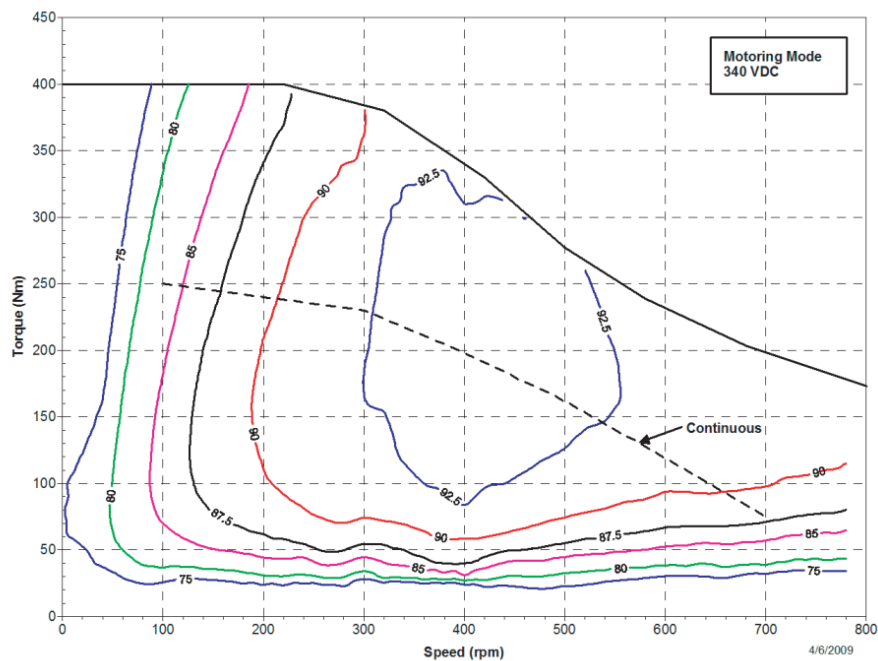


Figura 4. Mapa de eficiencia modo motor del vehículo “Zero”. Fuente: [10]

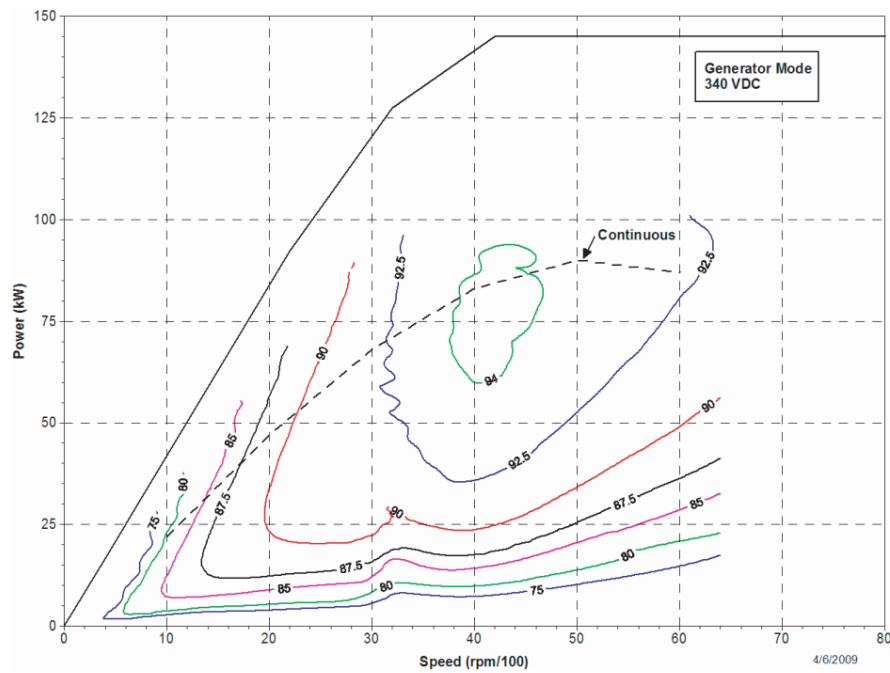


Figura 5. Mapa de eficiencia modo generador del vehículo “Zero”. Fuente: [10]

Para implementar este mapa de eficiencias en el modelo de cálculo se lleva a cabo una interpolación lineal. Para ello se reducen ambos mapas a una red de puntos. El código implementado y la discusión entre distintos métodos de interpolación viene recogido en el Anexo C.

A raíz de estos cambios se consigue un modelo preciso, a partir del cual se puede trabajar en la construcción de un modelo capaz de predecir el consumo.

### 3.2. PREDICCIÓN DEL CONSUMO

#### 3.2.1. MODELO DE PREDICCIÓN

El siguiente objetivo es el de creación de un modelo de predicción de consumo a partir del modelo comprobado y perfeccionado.

Dicho modelo está enfocado en vehículos de reparto de mercancía (como furgonetas de reparto).

A este modelo de predicción se le da como información de entrada: la ruta que se va a recorrer (recorrido, perfil topográfico y velocidades posibles), datos de la batería y los mismos datos fijados como en el modelo de cálculo. Además, a través del GPS, se le informa de la posición exacta en cada momento.

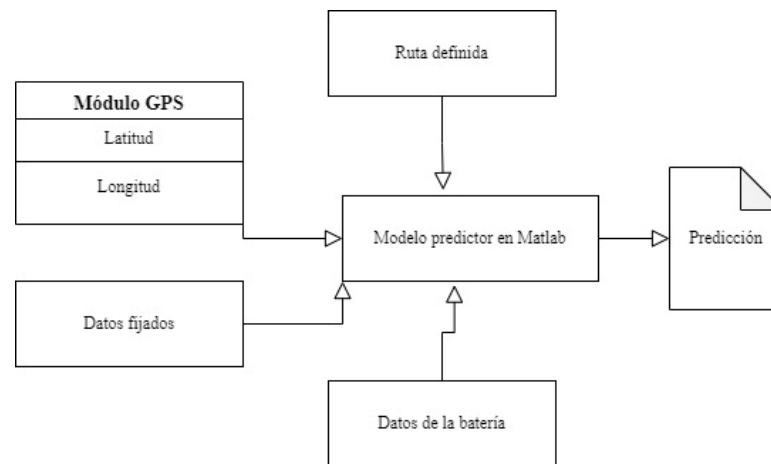


Figura 6. Modelo de predicción.

Con esto, el modelo debe ser capaz de predecir el consumo restante durante todo el recorrido de la ruta, indicando, si fuese necesario, el recorrido de vuelta.

### 3.2.2. CONSUMO PREDICHO

Partiendo de una ruta predefinida, la cual está dividida en multitud de puntos, donde se tiene los datos de longitud, latitud, altitud y velocidad en cada uno de esos puntos, se puede a través del modelo de cálculo obtener el consumo de dicha ruta.

A través del GPS se obtiene la posición exacta dentro de esa misma ruta y se realiza el cálculo del consumo de lo que resta de ruta. Dicho consumo se denomina  $E_{predicha}$ .

Este modelo de predicción realiza una comparativa, durante todo el transcurso de la ruta, entre la energía que resta en la batería y la energía que se predice que queda por gastar hasta el final. La energía en la batería debe ser siempre mayor a la predicha, en el caso de no serlo, el modelo debe aconsejar un recorrido de vuelta, consiguiendo así que el vehículo nunca se quede sin energía.

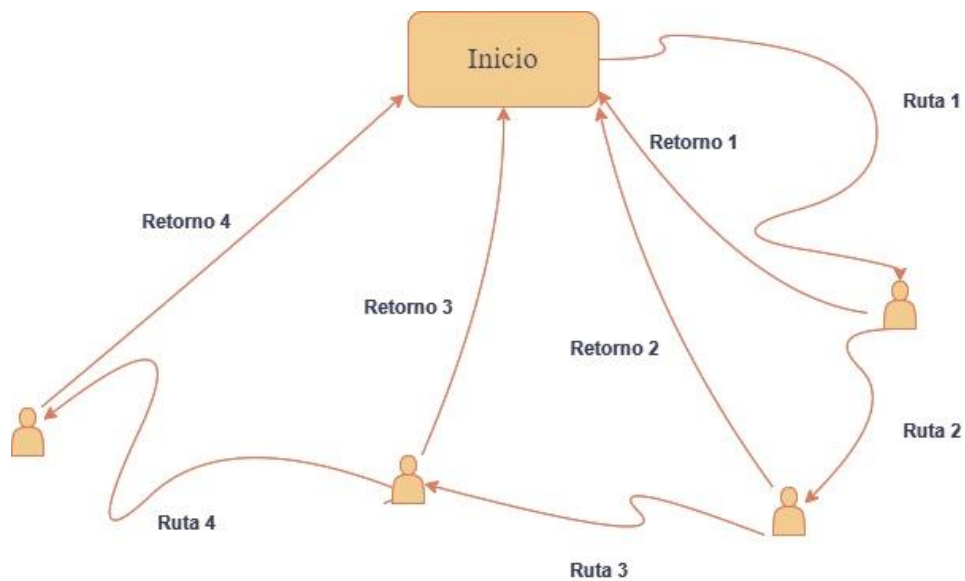
$$E_{batería} > E_{predicha} \quad ( 2 )$$

donde:

- La energía que resta de la batería ( $E_{batería}$ ) se obtiene de la medición directa de la misma, esto hace referencia al SoC (State of Charge).
- La energía predicha ( $E_{predicha}$ ) es la energía necesaria para recorrer lo que resta de ruta. Se obtiene a partir del modelo de cálculo.

### 3.2.3. ENSAYOS PARA COMPROBAR EL MODELO DE PREDICCIÓN

En primer lugar, se diseña una ruta en consonancia con lo anteriormente mencionado. Es decir, un recorrido con distintas entregas, donde cada entrega tiene un retorno al lugar de origen. De esta manera si el modelo predice que no se tiene la energía suficiente para realizar la totalidad de la ruta, este, deberá indicar cuantas entregas se pueden realizar y que retorno tomar.



*Figura 7. Rutas y retornos.*

Durante los ensayos se recorre la ruta con el modelo de predicción en funcionamiento. El modo de funcionamiento del modelo de predicción es cambiado para realizar los ensayos. En vez de medir y calcular la energía restante en la batería, esta va a ser un dato inicial, para así conseguir que este dato se ajuste a los objetivos de cada ensayo.

Se llevan a cabo dos ensayos de predicción:

- Ensayo con energía suficiente: en este ensayo se fija una energía inicial en la batería insuficiente para realizar la ruta completa, es decir, se le va a decir al modelo que no dispone de la energía necesaria en la batería para realizar la ruta completa. De esta forma se comprueba que el modelo propone realizar únicamente hasta el reparto que permita la batería.
- Ensayo con energía inicial suficiente, pero con consumo adicional: en este ensayo se fija una energía inicial en la batería ligeramente superior al gasto teórico de toda la ruta. La intención es llevar a cabo una conducción que suponga un gasto excesivo (saliendo de la ruta programada, parando y acelerando, etc), emulando así situaciones de alta congestión del tráfico o desvíos por obras, donde el consumo sería mayor del esperado.

#### 3.2.4. ESTUDIO DE LOS ENSAYOS DEL MODELO DE PREDICCIÓN

Durante los ensayos se recogen los datos de la batería, los del GPS y la predicción segundo a segundo del modelo.

En Excel se construye el modelo predictor y se realiza el estudio.

Ambos ensayos fueron satisfactorios y no se precisó de modificaciones en el modelo. Con esto se da por concluida la creación del modelo predictor.

#### 4. MARCO TEÓRICO

A continuación, se detallan las ecuaciones dinámicas en las que se sustenta el modelo de cálculo de consumo.

Las fuerzas involucradas en el avance del vehículo son las siguientes:

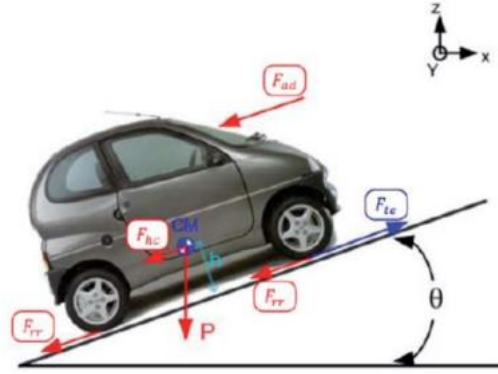


Figura 8. Fuerzas involucradas. Fuente: [11]

$$F_{tot} = F_{rr} + F_{ad} + F_{as} + F_{acl} + F_{aca} \quad (3)$$

donde:

- $F_{tot}$ : Fuerza total [N].
- $F_{rr}$ : Fuerza de rodadura [N].
- $F_{ad}$ : Fuerza aerodinámica [N].
- $F_{as}$ : Fuerza de ascensión [N].
- $F_{acl}$ : Fuerza de aceleración [N].
- $F_{aca}$ : Fuerza de aceleración de masas rotativas [N].

Basándose en estas fuerzas se obtiene la energía necesaria para el avance:

##### Trabajo de Rodadura

$$W_{rr} = C_{rr} * M * g * \cos \theta * d \quad (4)$$

donde:

- $W_{rr}$ : trabajo correspondiente a la rodadura [Ws]
- $C_{rr}$ : Coeficiente de rodadura (depende del terreno) [-].

- M: Masa total [kg].
- g: Constante gravitacional [ $\frac{m}{s^2}$ ]
- $\theta$ : Ángulo de pendiente [°]
- d: distancia recorrida [m]

**Trabajo para vencer la fuerza aerodinámica**

$$W_{ad} = \frac{\rho}{2} * C_{ad} * A * \Delta v^2 * d \quad ( 5 )$$

donde:

- $W_{ad}$ : trabajo correspondiente a la fuerza aerodinámica [Ws].
- $\rho$ : Densidad del aire [ $\frac{kg}{m^3}$ ].
- $C_{ad}$ : Coeficiente aerodinámico (depende del diseño del vehículo) [-].
- A: Área frontal [ $m^2$ ].
- v: velocidad relativa respecto del aire [ $\frac{m}{s}$ ].

**Variación de energía potencial**

$$\Delta E_{pot} = M * g * \sin \theta * \Delta h \quad ( 6 )$$

donde:

- $\Delta E_{pot}$ : Variación de energía potencial entre dos puntos [Ws]
- $\Delta h$ : diferencia de altitud entre un punto y el siguiente [m]

**Variación de la energía cinética**

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} * 1.05 * M * \Delta v^2 \quad ( 7 )$$

donde:

- $\Delta E_c$ : variación de energía cinética entre dos puntos [Ws]
- $\Delta v^2$ : variación de las velocidades [ $\frac{m^2}{s^2}$ ]

Esta ecuación se basa en las siguientes fuerzas:

### **Fuerza de aceleración**

$$F_{acl} = M * a \quad ( 8 )$$

donde:

- a: aceleración [ $\frac{m}{s^2}$ ]

### **Fuerza de masas rotativas**

$$F_{aca} = J * a * \frac{G^2}{r^2} \quad ( 9 )$$

donde:

- J: inercia de las masas en rotación [ $kg*m^2$ ].
- G: Relación de transmisión (entre la velocidad de giro del motor y las ruedas) [-].
- r: radio de las ruedas [m].

Para el cálculo de esta fuerza se suele trabajar con una aproximación [12]. El valor de la fuerza de las masas rotativas es de alrededor del 5% de la fuerza de aceleración.

$$F_{aca} \cong 0,05 * F_{acl} \quad ( 10 )$$

Finalmente, la ecuación con al que se trabaja para realizar el cálculo del consumo entre un punto y el siguiente en la ruta, es la siguiente:

$$E_{calculada} = \Delta E_c + \Delta E_{pot} + W_{ad} + W_{rr} \quad ( 11 )$$

## 5. ENSAYOS

A continuación, se detallan los instrumentos y el equipo utilizado durante los ensayos, el protocolo llevado a cabo para cada ensayo, las rutas diseñadas y el objeto de estudio en cada caso.

### 5.1. INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPAMIENTO

#### Vehículos

En los ensayos se hace uso de dos vehículos distintos, “Zylog” y “Zero”. El “Zylog” es el modelo Zylog CC 4.0 de la marca Zytel y el “Zero”, el cual se trata de un Suzuki de la serie Jimny el cual fue modificado (proceso de electrificación) por la empresa Zytel Automoción.



*Figura 9. Zylog. Fuente: [10]*



*Figura 10. Vehículo “Zero”.*

A continuación, vienen recogidas las características principales de cada uno.



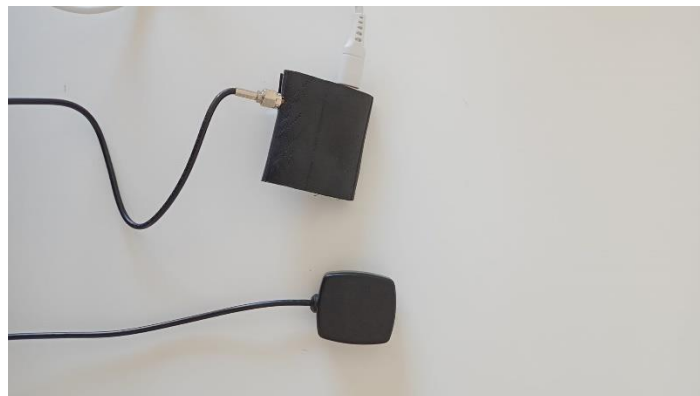
	<i>Potencia motor [kW]</i>	<i>Tipo de motor</i>	<i>Energía total [kWh]</i>	<i>Tipo de baterías</i>	<i>Peso [kg]</i>	<i>Área frontal [m<sup>2</sup>]</i>
<i>Zylog</i>	<i>3,8</i>	<i>Motor CC con escobillas</i>	<i>8,88</i>	<i>Plomo-ácido</i>	<i>824</i>	<i>2,52</i>
<i>Zero</i>	<i>145</i>	<i>Motor CC sin escobillas</i>	<i>64,87</i>	<i>Ion-litio</i>	<i>1840</i>	<i>2,75</i>

*Tabla 2. Características de ambos vehículos.*

### Herramientas para la toma de datos

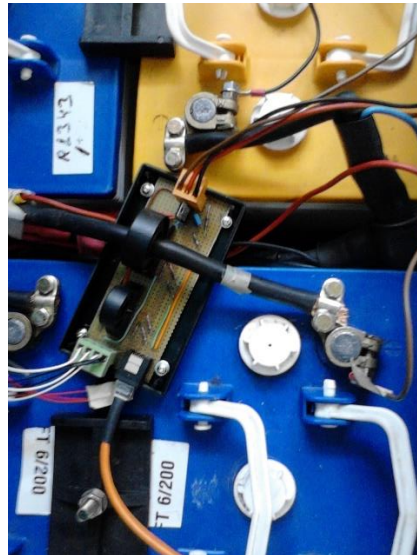
Un ordenador portátil, necesario para guardar los datos tomados por las herramientas y dentro del cual se tenga el software necesario.

Un módulo GPS, modelo VMA 430 de la marca Velleman [13]. En la figura siguiente aparece el módulo en cuestión con la antena (elemento en la parte inferior de la figura). Este módulo GPS es conectado al ordenador.



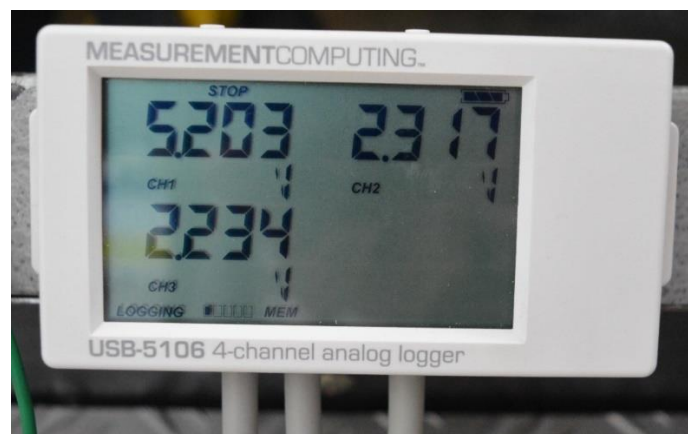
*Figura 11. Módulo GPS.*

Sensores encargados de la medición de tensión y corriente en la batería. Estos sensores se pusieron a punto en [7], para realizar la medición en el Zylog.



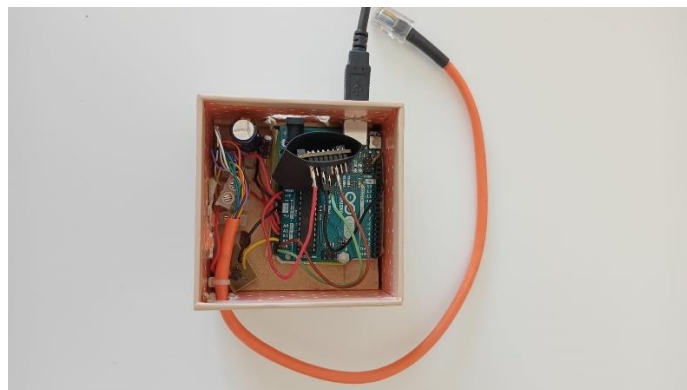
*Figura 12. Sensores de medición de tensión y corriente.*

Registrador USB-5100 Series [14] del fabricante Measurement Computer Corporation. Este es conectado a los sensores y almacena la información.



*Figura 13. Registrador USB-5100 Series*

Una placa Arduino Uno que cumple la función de BMS (Battery Managment System). Esta placa fue diseñada y construida en [7] para procesar las señales transmitidas por los sensores.



*Figura 14. Placa Arduino.*

El cable naranja se conecta a los sensores y el cable negro al ordenador.

### Software

Para la toma de datos para el caso del vehículo Zero se hace uso del “UQM Motor Diagnostic Software” del fabricante UQM Technologies, Inc [15].

Para la implementación del modelo de cálculo se hace uso de Matlab de MathWorks [8].

Para el estudio de los datos recogidos en los ensayos se hace uso de Microsoft Excel.

Para el uso del registrador se hace uso del USB-5100 Series Software de Measurement Computer Corporation [15].

## **5.2. PROTOCOLO DE ENSAYOS**

Todo ensayo sigue un orden y una metodología que a continuación se describe. Como se ha mencionado, en los ensayos se hace uso de dos vehículos distintos por lo cual se distingue en el protocolo aquellas acciones que son únicas de un vehículo con el nombre del vehículo entre paréntesis.

### **Preparación del vehículo**

- Comprobación de una meteorología favorable.
- Comprobación/Hinchado de ruedas hasta la presión necesaria.
- (Zylog) Medición con un polímetro de la tensión en la batería.
- Comprobación de valores de tensión correctos de la batería.
- (Zylog) Conexión del registrador a la batería.
- (Zylog) Comprobación de la correcta lectura del registrador.
- (Zylog) Conexión del Arduino a la batería.
- (Zylog) Conexión del Arduino al ordenador.
- Conexión del GPS al ordenador.
- (Zero) Conexión del controlador UQM al ordenador.
- Lanzamiento de la aplicación de Matlab para el registro de datos.
- Comprobación de la correcta lectura de los elementos conectados al ordenador.

### **Preparación de ensayo**

- Selección del parámetro objeto de estudio.
- Selección de la ruta.

### **Ensayo**

- Conducción acorde con los objetivos.
- Recopilación de datos.
- Guardado de datos para su estudio posterior.
- Medición de los valores de tensión en las baterías.

A través de este protocolo se consigue garantizar la repetibilidad y precisión de los datos recopilados, prevenir la aparición de datos anómalos, permite probar de manera rigurosa y controlada las hipótesis planteadas en la investigación, minimizar sesgos y errores y mejorar la eficiencia de los ensayos.

### **5.3. ESCENARIOS DE CONDUCCIÓN**

Para el estudio de los distintos parámetros se han diseñado una serie de rutas a medida, con el fin de aislar todo lo posible el parámetro de estudio.

Estas rutas se encuentran dentro del recinto del Campus Río Ebro. Esto se debe a que ambos vehículos no están matriculados y por tanto no pueden circular por la calle.

Las rutas diseñadas son las siguientes:

**Ruta principal:** se trata de la ruta más extensa (4,2 km) y versátil, está diseñada de tal forma que incluya una gran variedad de giros (cerrados y abiertos), un gran desnivel y grandes rectas que permitan una amplia horquilla de velocidades

Además, esta ruta se ha diseñado de tal manera que simule un posible recorrido urbano con distintos puntos de entrega. Es por ello por lo que esta ruta está compuesta por 4 rutas distintas (“R1”, “R2”, “R3” y “R4”) con sus correspondientes retornos al lugar de origen (“r1”, “r2” y “r3”).

**Ruta de giros:** esta ruta está compuesta por dos circunferencias distintas, una con un radio de 25 metros y otra con uno de 12,5 metros. Se ha buscado un terreno plano (eliminando el efecto de la pendiente) y un recorrido donde el radio de giro esté perfectamente definido.

**Ruta de recta:** se trata de una recta de 150 metros, donde se ha buscado un terreno lo más plano posible para que al igual que en el caso de la ruta anterior se elimine el efecto de la pendiente.

**Ruta de velocidades:** este recorrido es muy similar a la ruta “R4”. Se ha diseñado para tener una serie de giros y rectas iguales y bien definidos. Esta ruta ha sido pensada principalmente para ensayar a distintas velocidades

En la siguiente tabla vienen recogidas las distintas rutas con sus principales características:

<i>Nombre</i>	<i>Rutas</i>	<i>Distancia [m]</i>	<i>Max.Pend + [%]</i>	<i>Max.Pend - [%]</i>	<i>Nº giros</i>	<i>Max. Recta [m]</i>	<i>Variación de altura[m]</i>
<i>Ruta principal</i>	<i>R1+R2+R3+R4 (r1, r2, r3)</i>	<i>4017</i>	<i>6,7</i>	<i>-6,7</i>	<i>40</i>	<i>563</i>	<i>3,5</i>
<i>R1</i>		<i>944</i>	<i>2,6</i>	<i>-6,7</i>	<i>10</i>	<i>218</i>	<i>2,8</i>
<i>R2</i>		<i>1018</i>	<i>0,4</i>	<i>-6,1</i>	<i>10</i>	<i>190</i>	<i>0,8</i>
<i>R3</i>		<i>1004</i>	<i>2,64</i>	<i>0,4</i>	<i>6</i>	<i>563</i>	<i>2,0</i>
<i>R4</i>		<i>1051</i>	<i>6,7</i>	<i>-2,0</i>	<i>14</i>	<i>150</i>	<i>2,5</i>
<i>r1</i>		<i>944</i>	<i>6,7</i>	<i>-2,6</i>	<i>9</i>	<i>218</i>	<i>2,8</i>
<i>r2</i>		<i>1018</i>	<i>6,7</i>	<i>-0,1</i>	<i>8</i>	<i>449</i>	<i>3,5</i>
<i>r3</i>		<i>246</i>	<i>6,7</i>	<i>0,0</i>	<i>4</i>	<i>150</i>	<i>1,5</i>
<i>Ruta de giros</i>	<i>Giro 25+Giro 12,5</i>	<i>314</i>	<i>0,5</i>	<i>-0,5</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>
<i>Giro 25</i>		<i>157</i>	<i>0,5</i>	<i>-0,5</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0,5</i>
<i>Giro 12,5</i>		<i>157</i>	<i>0,4</i>	<i>-0,4</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0,1</i>
<i>Ruta de recta</i>		<i>150</i>	<i>0,0</i>	<i>-1,8</i>	<i>-</i>	<i>150</i>	<i>1,3</i>
<i>Ruta de velocidades</i>		<i>740</i>	<i>1,15</i>	<i>0,54</i>	<i>8</i>	<i>143</i>	<i>1,9</i>

*Tabla 3. Resumen rutas. Elaboración propia*

La columna “Rutas” indica si la ruta en cuestión está formada por otras rutas, luego se representa la distancia total, la pendiente máxima positiva y negativa, el número total de giros, la distancia de la recta más larga y la variación de altura entre el punto de mayor y menor elevación.

Cabe mencionar que los datos de “Ruta principal” son sin tener en cuenta los retornos.

Las distintas rutas vienen representadas en el Anexo A.

#### **5.4. RESUMEN DE ENSAYOS.**

A continuación, se expone una tabla a modo resumen de todos los ensayos realizados, donde se recoge la fecha de realización, el vehículo utilizado, la ruta y el parámetro objeto de estudio.

<i>Ensayo</i>	<i>Fecha</i>	<i>Vehículo</i>	<i>Ruta</i>	<i>Parámetro</i>
<i>1</i>	<i>16/09/2022</i>	<i>Zylog</i>	<i>Ruta principal</i>	<i>-</i>
<i>2</i>	<i>13/10/2022</i>	<i>Zylog</i>	<i>Ruta principal</i>	<i>-</i>
<i>3</i>	<i>18/10/2022</i>	<i>Zylog</i>	<i>Ruta de velocidades</i>	<i>Altitud</i>
<i>4</i>	<i>15/11/2022</i>	<i>Zylog</i>	<i>Ruta de velocidades</i>	<i>Velocidad</i>
<i>5</i>	<i>16/12/2022</i>	<i>Zylog</i>	<i>Ruta principal</i>	<i>Batería</i>
<i>6</i>	<i>12/03/2023</i>	<i>Zylog</i>	<i>Ruta de giros y ruta de recta</i>	<i>Velocidad angular</i>
<i>7</i>	<i>16/04/2023</i>	<i>Zero</i>	<i>Ruta de velocidades</i>	<i>-</i>
<i>8</i>	<i>24/04/2023</i>	<i>Zero</i>	<i>Ruta principal</i>	<i>Rendimiento de motor</i>
<i>9</i>	<i>09/07/2023</i>	<i>Zero</i>	<i>Ruta principal</i>	<i>Predicción</i>
<i>10</i>	<i>09/07/2023</i>	<i>Zero</i>	<i>Ruta principal</i>	<i>Predicción</i>

*Tabla 4. Ensayos realizados.*

## **6. ANÁLISIS Y RESULTADOS.**

### ***6.1. FINALIDAD Y TRANSCURSO DE LOS ENSAYOS***

Por un lado, se tiene los ensayos utilizados para la comprobación del modelo de cálculo.

Estos buscan comprobar que el modelo de cálculo se asemeja a la realidad de una manera precisa. Es decir, estos ensayos funcionan como herramienta para determinar si el modelo funciona o no correctamente.

Para evaluar este funcionamiento, como ya se ha mencionado anteriormente, se aíslan y estudian una serie de parámetros con el fin de determinar si alguno de ellos son fuente de error y por tanto causantes del no correcto funcionamiento del modelo.

Estos ensayos se basan en la medición directa del consumo y de la obtención de una serie de datos que son necesarios para realizar un cálculo de consumo.

Para cada parámetro estudiado se compara el consumo medido con el consumo calculado, a partir de dicha comparación se discute si dicho parámetro es fuente de error o no.

En el caso de encontrar una fuente de error, el modelo es perfeccionado para que esta siga siendo ensayado hasta el punto de que este funcione de manera satisfactoria.

Por otro lado, se tiene los ensayos destinados a comprobar el modelo de predicción, en estos casos el parámetro de estudio es la propia predicción del modelo. Para ello se va a simular distintas situaciones que pongan a prueba el modelo de predicción.

En el momento en que cada modelo funcione de manera correcta y precisa se darán por concluidos los ensayos con dicho modelo.

### ***6.2. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE ENSAYOS***

#### ***Ensayo 1: Zylog / Ruta principal / Equipos e instrumentos***

La finalidad de este primer ensayo es la comprobación de que todos los equipos e instrumentos utilizados funcionan correctamente. Sirve como primera toma de contacto con la ruta principal y de puesta a punto de todo lo necesario para futuros ensayos.

Consiste en la conducción por la ruta principal recogiendo los datos del GPS, registrador y Arduino para su posterior análisis. Se ha seleccionado esta ruta tanto por su longitud como por su diversidad en cuanto a giros, rectas y cambios de altitud se refiere. Para de esta manera, cerciorarse del correcto funcionamiento en todos los ámbitos.

A continuación, en la figura 15 viene representada la evolución a lo largo de la ruta de la tensión e intensidad en la batería (obtenidos a través del registrador) y en la figura 16 la velocidad del vehículo y la altitud (obtenidos a través del GPS):

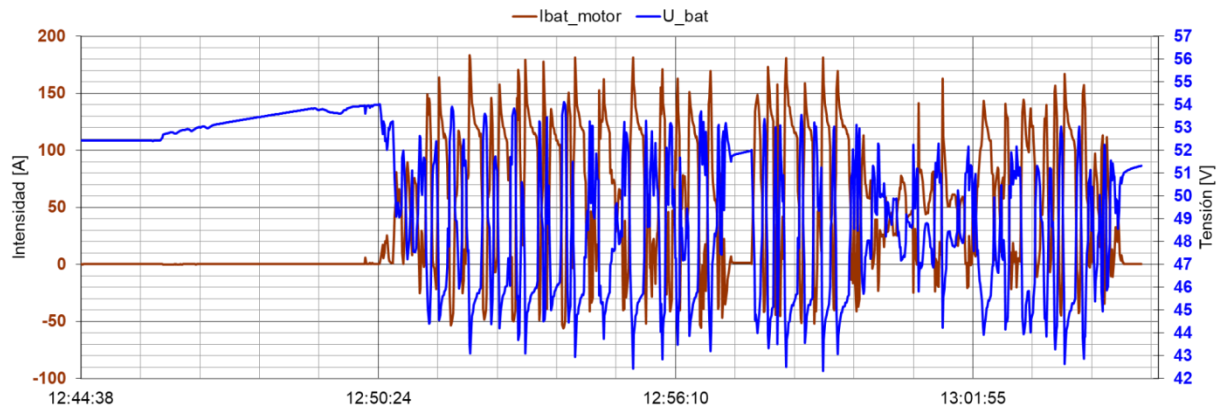


Figura 15. Tensión e intensidad en la batería.

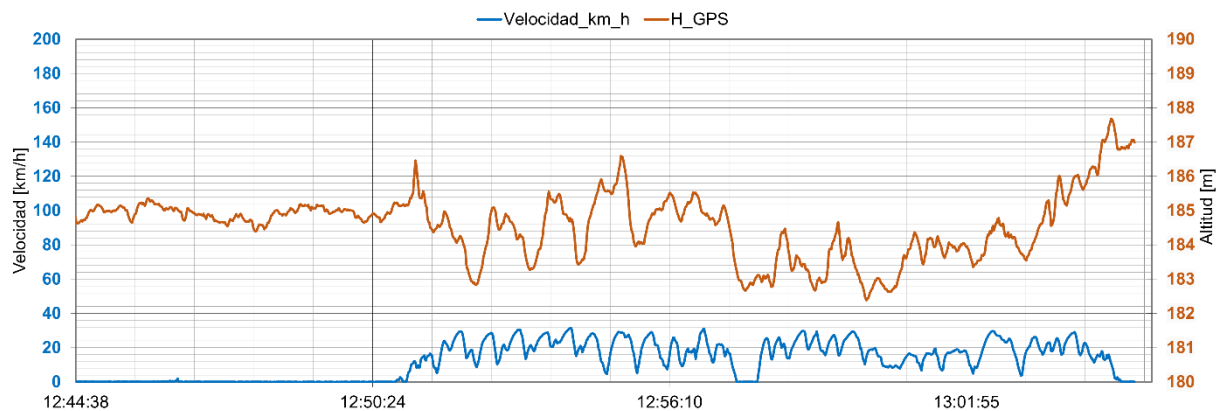


Figura 16. Altitud y velocidad.

Se puede observar como los datos recogidos de la batería son lógicos y no hay pérdida de datos (no se aprecia ninguna falta de información a lo largo de todo el ensayo), esto ocurre igual que en el caso de los datos de la figura 16.

No ha habido ningún problema con el vehículo y a la vista del estado de la batería tras el ensayo (estas han sido medidas antes y después del ensayo) se puede concluir que la toma de datos es correcta y el vehículo funciona correctamente.

### ***Ensayo 2: Zylog / Ruta principal / Precisión del modelo***

A partir de este ensayo se busca determinar cuan bueno es o cuan cercano es a la realidad, el modelo de cálculo de consumo que se tiene. Para ello se va a ensayar en la ruta principal, recorriéndola en su totalidad, recogiendo los datos pertinentes para su posterior estudio y comparación.

A continuación, se tiene la comparación entre el consumo real y el calculado a partir del modelo:



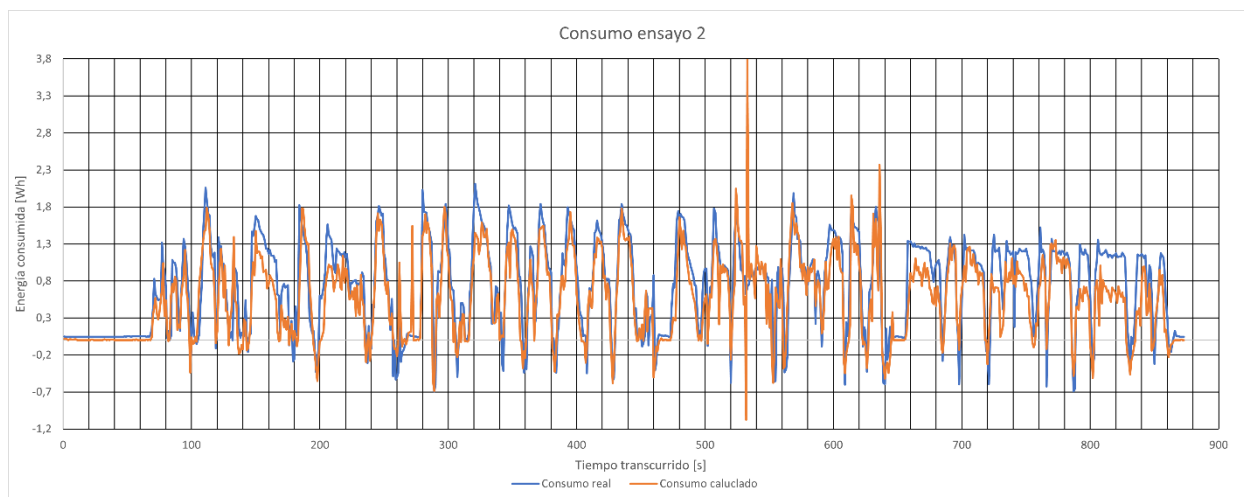


Figura 17. Consumo real y calculado.

Como se puede apreciar el cálculo de consumo tiene concordancia con la realidad, pero no es preciso. A simple vista se observan discrepancias en los consumos que suponen un error en el cálculo, que al final se traduce en una diferencia de 142,4 Wh. Suponiendo esto un error relativo del 22,5 %.

A continuación, una tabla resumen de los consumos:

	<i>Energía gastada [Wh]</i>	<i>Energía regenerada [Wh]</i>	<i>Consumo total [Wh]</i>
<i>Realidad</i>	656,5	-24,3	632,2
<i>Modelo</i>	512,7	-22,9	489,8

Tabla 5. Consumos ensayo 2.

En vista de los resultados se ha de mejorar bastante la precisión del modelo, para ello se va a estudiar diversos parámetros que pueden ser fuente de error en el cálculo.

El signo negativo en cuanto a consumos en este trabajo hace referencia a energía que entra en la batería y el signo positivo a energía que sale de esta.

### ***Ensayo 3: Zylog / Ruta de velocidades / Altitud***

En este tercer ensayo se busca estudiar la influencia del parámetro altitud, más concretamente, cuán importante es la precisión en la medición de esta.

Para ellos se opta por ensayar en “Ruta de velocidades”, el cual es un recorrido cerrado de tal manera que facilita la comparativa y además es un recorrido con una inclinación prácticamente constante.

Se van a estudiar 3 fuentes de datos distintas, los datos medidos con el GPS y los aportados por 2 herramientas (GPS Visualizer y el Instituto Geográfico Nacional). El GPS Visualizer es una herramienta online que se utiliza para la creación de rutas a partir de coordenadas geográficas y la página web del IGN permite realizar lo mismo que con el GPS Visualizer.

A continuación, aparecen comparados los valores de altitud de las distintas fuentes, los valores de altitud del IGN y del GPS Visualizer están referenciados en el eje izquierdo y los del GPS en el eje derecho:

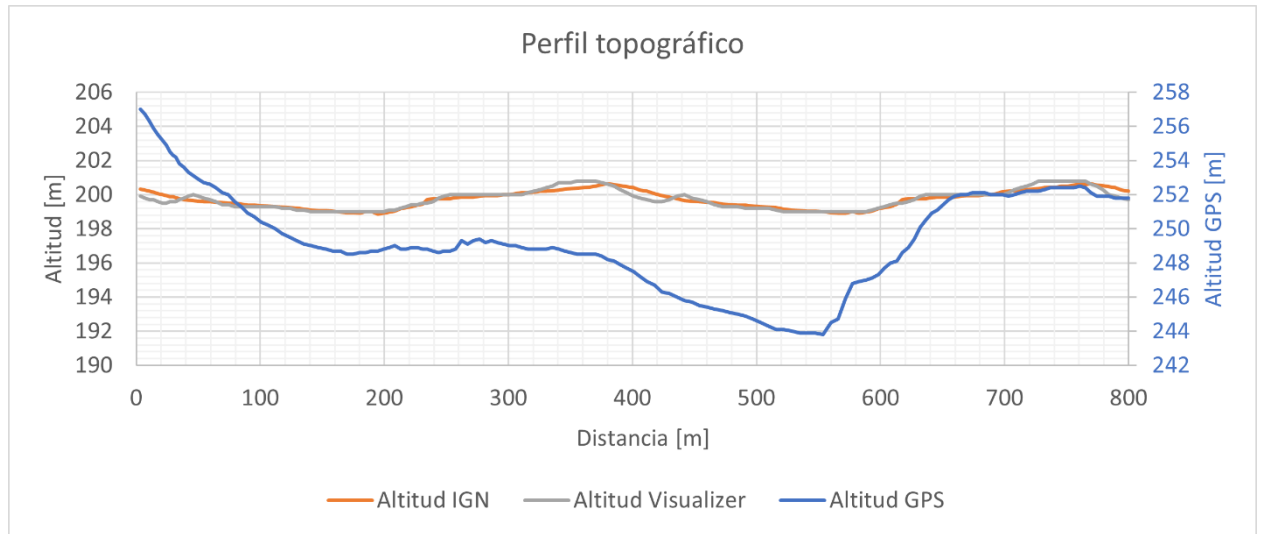


Figura 18. Altitud ruta 4'.

El eje vertical derecho se usa para referenciar únicamente los datos de altitud del GPS. Ambos ejes verticales tienen el mismo rango de detalle para facilitar la comparación.

A la vista de los resultados se tiene que la fuente menos precisa es el GPS. En primer lugar, por los valores que aporta los cuales son lejanos a la realidad (aporta un valor de altitud de 250 m cuando en realidad la altitud en esos puntos es de 200 m sobre el nivel del mar). Segundo, al tratarse de una ruta en la que se realizan 2 vueltas a un mismo recorrido, las altitudes entre la primera pasada y la segunda deberían ser idénticas y esto no ocurre en el caso del GPS. Todo esto sugiere que los datos aportados por el GPS no son precisos y no representan de manera verídica la realidad.

En los otros dos casos los datos arrojados son mucho más precisos, siendo la mejor opción el IGN donde se puede ver como el perfil topográfico es más suave en comparación con el del GPS Visualizer. Además, la resolución del valor de altitud para el caso del IGN es de 3 decimales y para el GPS Visualizer es de 1 decimal.

Los consumos recogidos son los siguientes, donde se tienen los consumos calculados por el modelo con las distintas fuentes de altitud y el consumo medido:

	<i>Energía gastada [Wh]</i>	<i>Energía regenerada [Wh]</i>	<i>Consumo total [Wh]</i>
<i>GPS Visualizer</i>	83,48	-0,35	83,13
<i>IGN</i>	82,9	-0,15	82,75
<i>GPS</i>	89,7	-0,92	88,78
<i>Medida experimental</i>	125,96	-0,185	125,77

Tabla 6. Consumos ensayo 3.

En vista de los resultados se aprecia como las diferencias entre el uso del IGN o del GPS Visualizer son mínimas, en cambio haciendo uso de los datos aportados por el GPS el consumo aumenta considerablemente (un incremento de alrededor del 8 %). Estos datos son lógicos ya que el perfil topográfico aportado por el GPS es uno mucho más abrupto y por tanto más demandante energéticamente hablando.

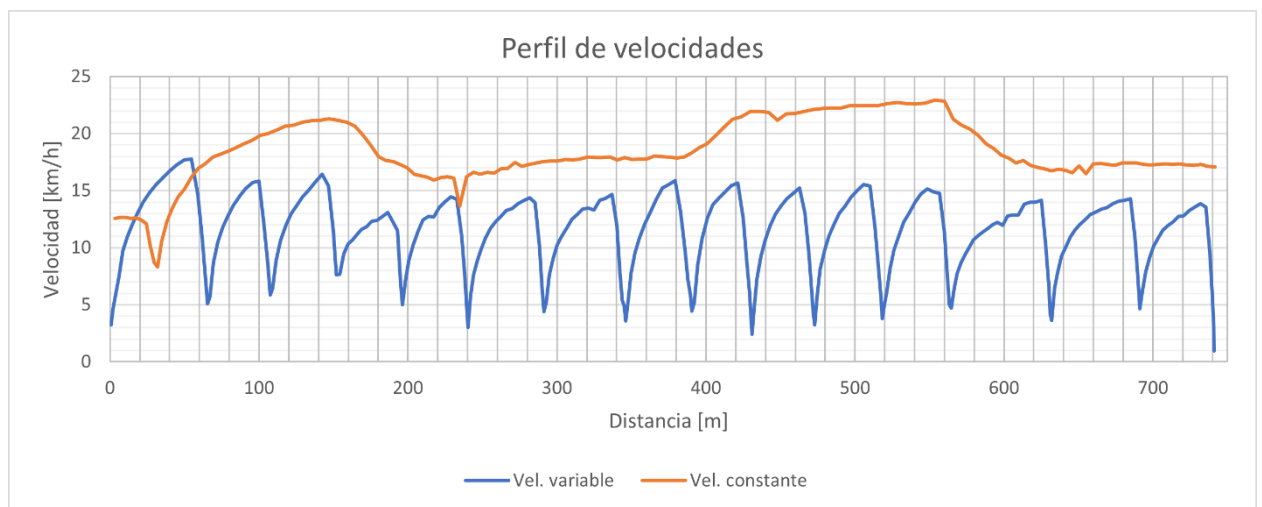
No obstante, estos resultados del cálculo están muy lejos de la realidad, y si bien se va a cambiar el uso del GPS como fuente de información de la altitud (se pasa a trabajar con el más preciso, que es en este caso el IGN) es necesario seguir estudiando otros parámetros que sean posibles fuentes de error.

#### ***Ensayo 4: Zylog / Ruta de velocidades / Cambios de velocidad***

Este cuarto ensayo busca estudiar la influencia de los cambios de velocidades en el cálculo del consumo.

La ruta seleccionada es la “Ruta de velocidades”, esta ruta consta de dos grandes rectas en las que poder variar fácilmente la velocidad. Además, al tratarse de un recorrido corto y cerrado, permite una muy buena comparativa al pasar por los mismos tramos varias veces.

El ensayo consiste en un primer recorrido de la ruta a velocidad constante y un segundo a velocidad variable (una concatenación de aceleraciones y frenadas).



*Figura 19. Perfil de velocidades.*

A continuación, se expone la evolución del consumo comparando para cada caso el consumo real (este consumo real es el denominado hasta el momento como consumo medido) y el calculado por el modelo.

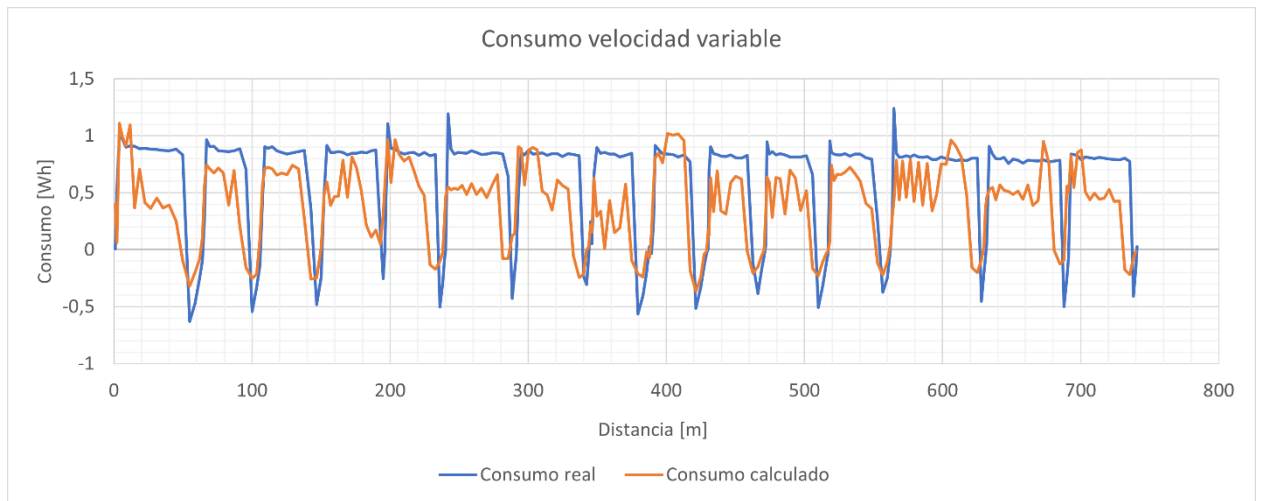


Figura 20. Comparativa de consumos con velocidad variable.

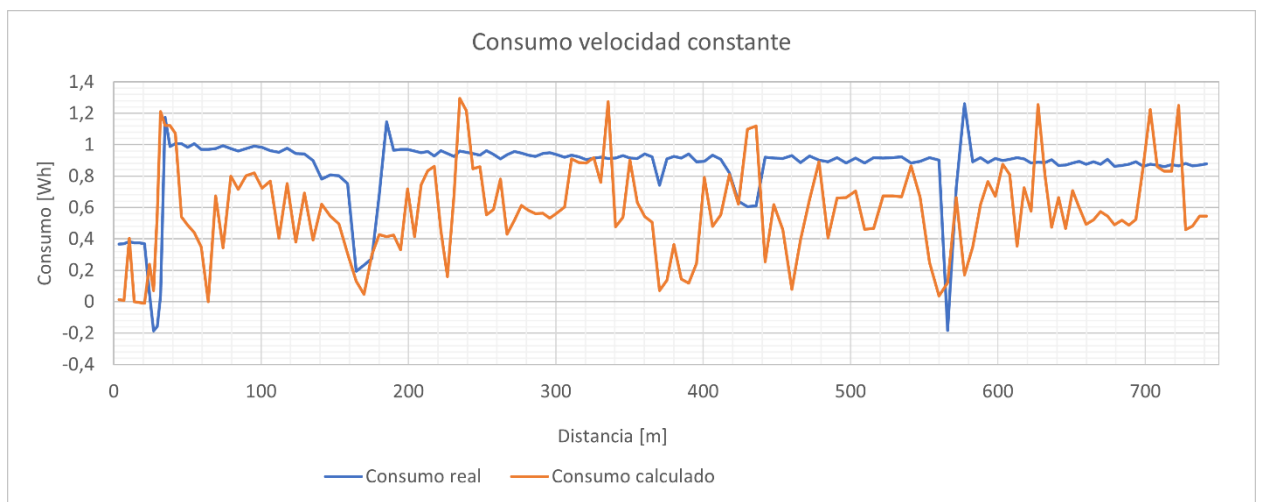


Figura 21. Comparativa de consumos con velocidad constante.

Consumos detallados:

Consumos	Energía gastada [Wh]	Energía regenerada [Wh]	Consumo total [Wh]
Real velocidad variable	155,39	-12,34	143,05
Calculado velocidad variable	104,15	-6,98	97,16
Real velocidad constante	127,73	-0,18	127,54
Calculado velocidad constante	82,27	-0,01	82,25

Tabla 7. Comparativa de consumos ensayo 4

Los errores relativos en uno y otro caso son muy parecidos, siendo el error en el caso de velocidad variable de un 32,1 % y en el caso de velocidad constante de 35,4 %.

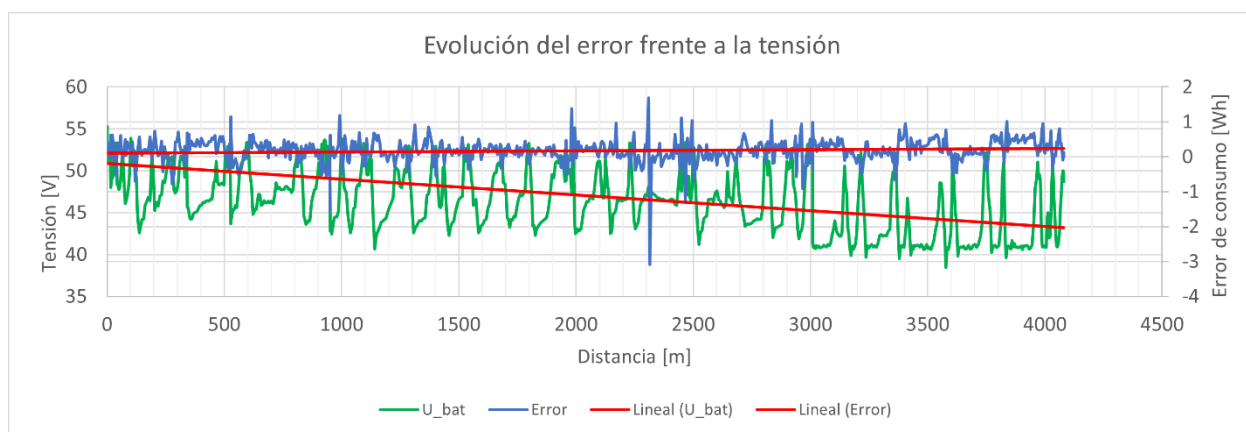
En base a los resultados se concluye que no se está cometiendo ningún fallo de cálculo relativo a los cambios de velocidades. Se sigue observando como en ambos casos persiste una diferencia notable con la realidad, pero la causa de esta diferencia no está relacionada con los cambios de velocidad.

### ***Ensayo 5: Zylog / Ruta principal / Estado de la batería***

En este ensayo se estudia la influencia del factor batería, más precisamente se busca saber si se está cometiendo un error de cálculo al no tener en cuenta el estado de carga de esta.

Se selecciona la “Ruta principal”, ya que es la más extensa. De esta manera se consigue tener al principio y final de la ruta unos estados de carga bastante distantes (el valor de tensión en la batería registrada al comenzar el ensayo es de 55,26 V y al finalizar es de 49,26 V).

Para ello se va a observar la evolución del error cometido en el cálculo con el transcurso de la ruta.



*Figura 22. Evolución del error del cálculo frente a la tensión.*

En vista de los resultados se puede concluir que no se está cometiendo ningún error de cálculo al no considerar el estado de carga de la batería. Se ve claramente que conforme la batería se encuentra más descargada el error no se acentúa o disminuye, sino que este permanece ajeno a la evolución de la tensión de la batería.

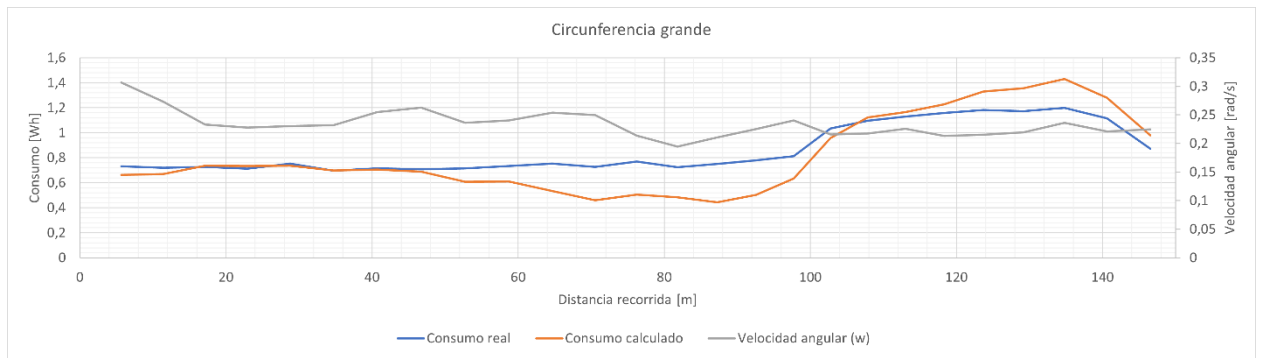
### ***Ensayo 6: Zylog / Ruta de giros y Ruta de recta / Velocidad angular***

El objetivo de este ensayo es estudiar si existe una diferencia en cuanto al error de cálculo cometido entre la conducción en línea recta y los giros.

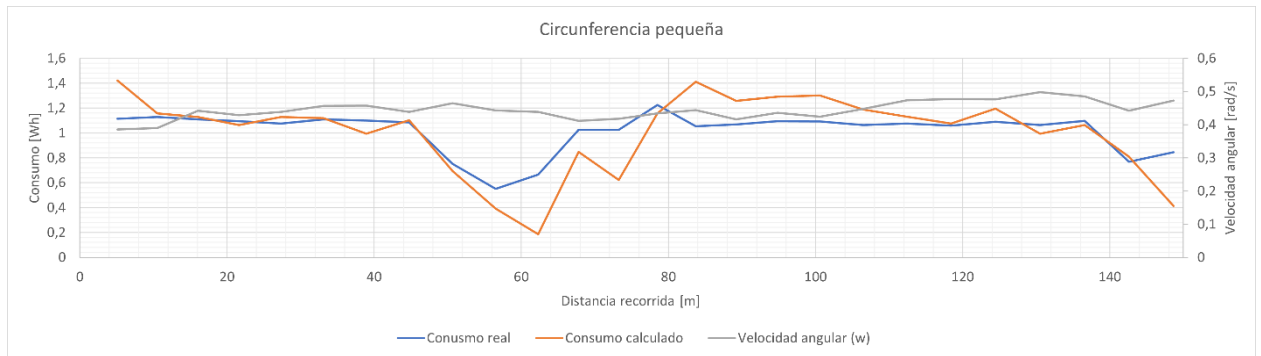
La ruta seleccionada es la “Ruta de giros y Ruta de recta”, la cual se ha diseñado específicamente para este ensayo. De esta manera se puede aislar el recorrido en línea recta y los giros. Todos los recorridos tienen la misma distancia y estos son recorridos a la misma velocidad (20 km/h) en todos los casos para disponer de una mejor comparativa.

Además, en esta ruta seleccionada existen 2 recorridos circulares distintos, esto es para estudiar a su vez si existe alguna diferencia en cuanto al radio de giro se refiere.

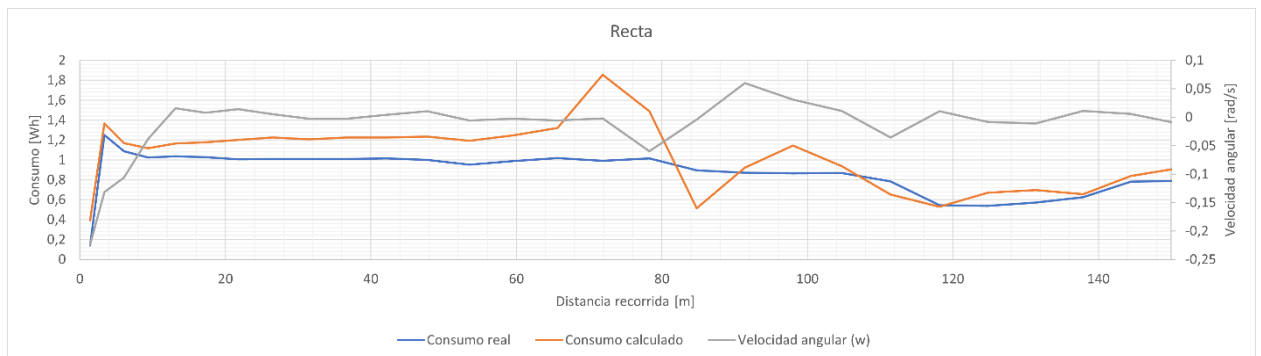
A continuación, se exponen las gráficas comparativas de consumos. Se ha incorporado en la figura el valor de la velocidad angular, de esta manera se puede ver si este parámetro ocasiona un error en el cálculo.



*Figura 23. Consumo circunferencia grande.*



*Figura 24. Consumo circunferencia pequeña.*



*Figura 25. Consumo en recta.*

A partir de las figuras se puede observar como independientemente del valor de la velocidad angular el error que se tiene no presenta ninguna relación clara con este. La velocidad angular, aunque distinta, se mantiene constante en cada caso a diferencia del error.

Se concluye por tanto que no se está cometiendo ningún error de cálculo

### ***Ensayo 7: Zero / Ruta de velocidades / Vehículo***

El parámetro que se busca estudiar es el del rendimiento del motor. Hasta el momento se estaba realizando el cálculo de consumo a partir de un valor de rendimiento del motor constante. Ahora se busca realizar un ensayo donde el cálculo no se base en un rendimiento constante, sino que este sea el adecuado en base a las prestaciones en cada momento.

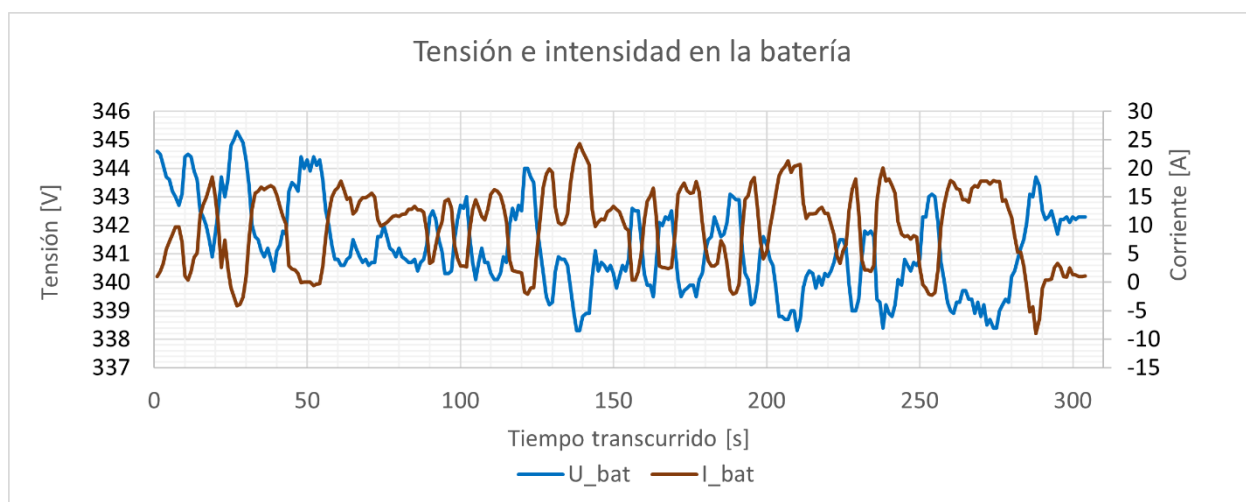
Para poder realizar dicho ensayo es necesario tener información detallada del motor, es decir, un mapa motor en el que poder basar los cálculos. No se tiene información ni se ha podido conseguir del motor del vehículo con el que se estaba ensayando hasta el momento.

A partir de esta problemática surgen dos opciones, una es la de ensayar el motor en un banco de pruebas, y otra, el trabajar con un vehículo distinto del cual se tenga un mapa de la eficiencia del motor. Se optó por la segunda solución, ya que se tenía otro vehículo que podía ser usado y del cual se tenía amplia información del motor.

Se trata del vehículo “Zero”, por tanto este ensayo 7 busca confirmar que el vehículo funciona de manera correcta y que los sistemas de obtención de datos también lo hacen. En este caso el Arduino y el registrador son sustituidos por un programa informático (UQM Motor Diagnostic Software) del propio fabricante donde a través de un ordenador se conecta al vehículo y obtiene la información necesaria.

El ensayo se lleva a cabo en la “Ruta de velocidades”, se ha seleccionado por su cercanía al lugar de origen y por contar con los recursos necesarios para un correcto testeo (grandes rectas, giros y variación de altitud).

A continuación, en la figura 26 vienen reflejados los datos de tensión y corriente en la batería recogidos:



*Figura 26. Tensión e intensidad ensayo 7.*

Los datos recogidos son coherentes y no se aprecia ninguna falta de información, además el vehículo funciona correctamente y no se aprecia ningún valor atípico en la tensión de las baterías antes o después.

Se puede concluir que la nueva toma de datos funciona correctamente, al igual que el nuevo vehículo y por tanto es apto para los siguientes ensayos.

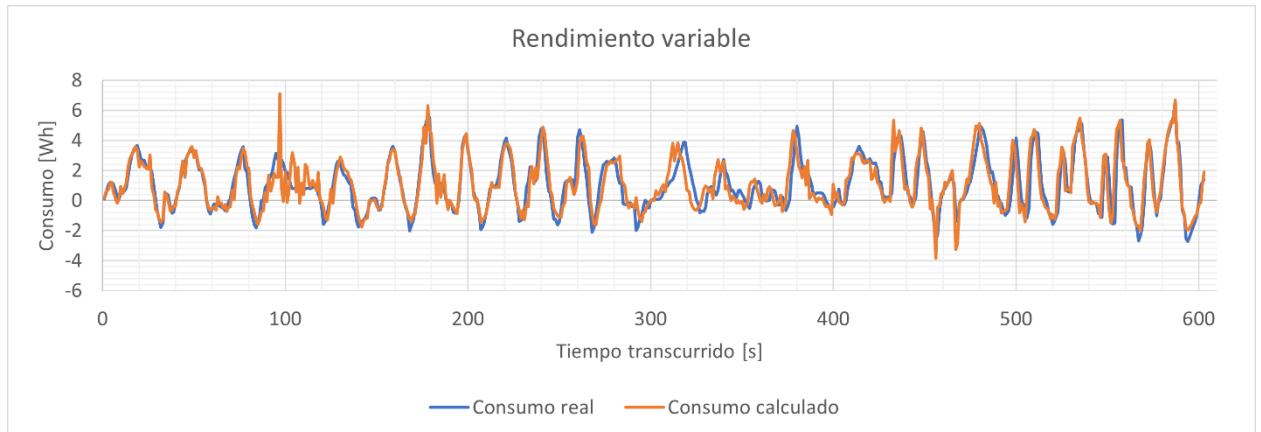
### ***Ensayo 8: Zero / Ruta principal / Rendimiento del motor***

El objetivo de este ensayo es el estudio del factor rendimiento del motor. Para ello se va a realizar la comparación del cálculo de consumo entre un rendimiento constante y un rendimiento variable.

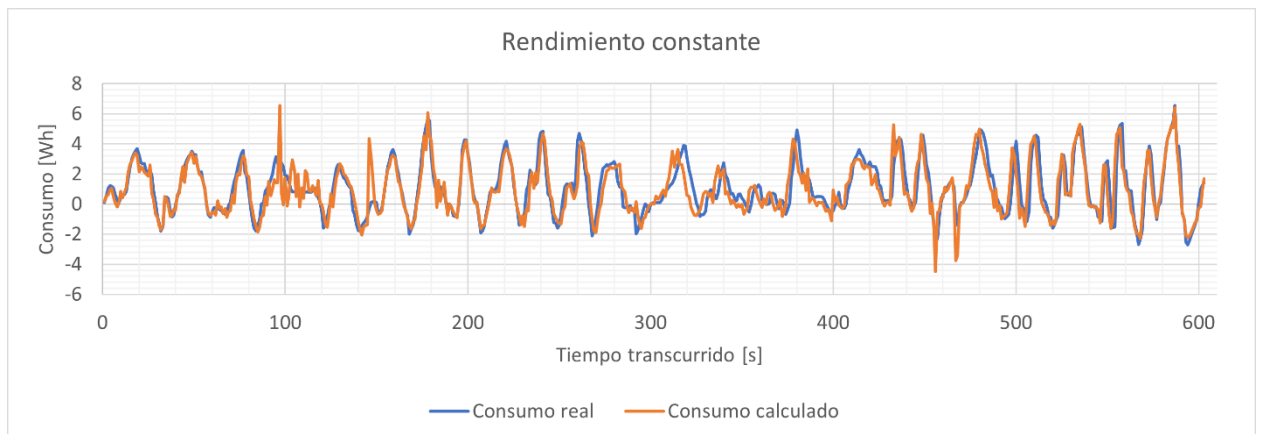
La implementación de un rendimiento variable en el modelo de cálculo se hace a partir de una interpolación lineal con los datos del mapa motor. Esta variación en el modelo de cálculo viene descrita en el Anexo C.

La ruta seleccionada para este ensayo es la “Ruta principal” ya que se trata de la ruta con mayor variedad y la más extensa.

A continuación, los resultados del ensayo:



*Figura 27. Comparativa de consumos con rendimiento variable.*



*Figura 28. Comparativa de consumos rendimiento constante*

Consumos detallados:

<i>Consumos</i>	<i>Energía gastada [Wh]</i>	<i>Energía regenerada [Wh]</i>	<i>Consumo total [Wh]</i>	<i>Error relativo [%]</i>
<i>Real</i>	801,8	143,9	657,9	
<i>Calculado rendimiento constante</i>	746,8	152,9	593,9	9,72
<i>Calculado rendimiento variable</i>	801,2	132,2	669	1,68

*Tabla 8. Consumos del Ensayo 8 detallados.*



Si bien a partir de las figuras 27 y 28 no es fácil vislumbrar diferencias entre ambos escenarios, a partir de los datos numéricos estas diferencias se ven claramente.

Cabe mencionar la influencia del cambio de vehículo, en el Ensayo 2 se tenía un error relativo en el cálculo de consumo de 22,5 %, y ahora con un rendimiento constante se tiene un error del 9,72 %. Esta reducción no se debe únicamente al calibrado del parámetro altitud, sino que también depende del motor en cuestión. El anterior vehículo tenía un motor de corriente continua con escobillas de 3,8 kW de potencia, ahora se tiene en el nuevo vehículo un motor de corriente continua sin escobillas de 145 kW.

El rango de operación dentro de un mapa de eficiencias de cada motor es distinto. En el caso del motor de 145 kW el área de operación es muy reducida (aun así, suficientemente amplia para ver diferencias con el uso de un rendimiento variable) debido a que el motor está siendo poco demandado (poca pendiente y velocidades bajas). A diferencia del motor de 3,8 kW, al ser un motor pequeño este está siendo demandado en mucha mayor medida (cabe mencionar que los vehículos no pesan lo mismo, pero en proporción el motor de 145kW es mucho más potente)

En vista de los resultados se ve claramente como el modelo que incorpora un rendimiento de motor variable es mucho más preciso. Se ha conseguido reducir la diferencia entre el cálculo y la realidad hasta un error relativo del 1,68 % a través de la calibración del parámetro de altitud y el del rendimiento del motor. Con esto se tiene un modelo que calcula de manera precisa el consumo de un vehículo eléctrico y a partir de este, se procede ensayar el apartado de predicción de consumos.

### ***Ensayo 9: Zero / Ruta principal / Predicción***

Con estos dos últimos ensayos se busca comprobar el correcto funcionamiento de la parte predictora del modelo.

Basándose en la Ecuación 2 se va a suponer un valor de energía que resta en la batería ( $E_{batería\ inicial}$ ) al comenzar el ensayo.

De este modo se va a realizar una comparación en todo momento entre la energía que se ha consumido ( $E_{medida}$ ) más la energía que se predice que queda por consumir ( $E_{predicha}$ ) frente a la energía que se ha determinado que tenía la batería al inicio del ensayo.

$$E_{batería\ inicial} \geq E_{medida} + E_{predicha} \quad (12)$$

A continuación, vienen reflejadas dichas energías,  $E_{medida}$  supone la energía consumida hasta el punto n (donde se encuentra el vehículo en ese instante) y  $E_{predicha}$  la energía que el modelo de predicción predice que se consumirá hasta llegar al final.

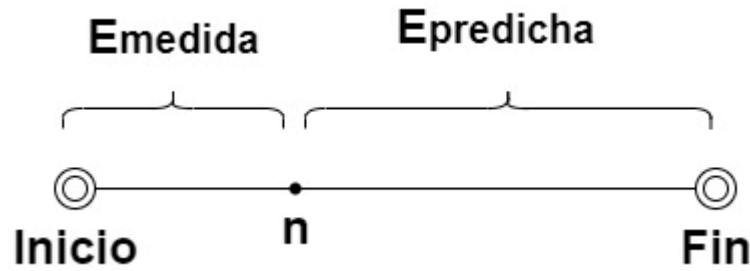


Figura 29. Esquema de energías en una ruta.

Este ensayo 9 se le va a informar al modelo de no tener energía en la batería suficiente para realizar la totalidad de la ruta. De este modo el modelo debería indicar la solución que permita realizar el mayor número de recorridos posibles (cada recorrido supone un reparto o una ruta distinta) con su correspondiente retorno.

El ensayo se va a realizar en la “Ruta principal” ya que es la que está diseñada para asemejarse a una ruta de reparto real en la que cada entrega tiene su correspondiente retorno en caso de necesitar usarlo. Esta se va a recorrer siguiendo las indicaciones del modelo de predicción, para posteriormente comprobar que este funciona correctamente.

La energía en la batería (dato ficticio para este ensayo) es de 530 Wh, lo cual permite realizar la ruta R1, R2 y tomar el retorno 2 con un sobrante de energía de 23 Wh.

Los resultados vienen reflejados a continuación:

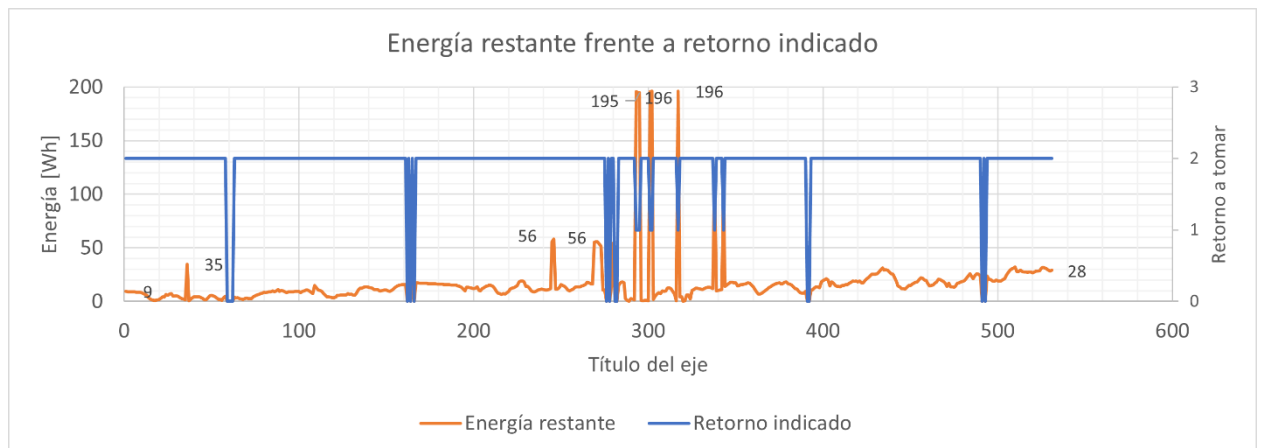


Figura 30. Evolución de la energía restante al final y el retorno indicado por el modelo.

En la figura vienen reflejados dos datos (los cuales el modelo calcula cada segundo), la energía que el modelo predice que restará en la batería al finalizar el recorrido que recomienda y el retorno que recomienda tomar.

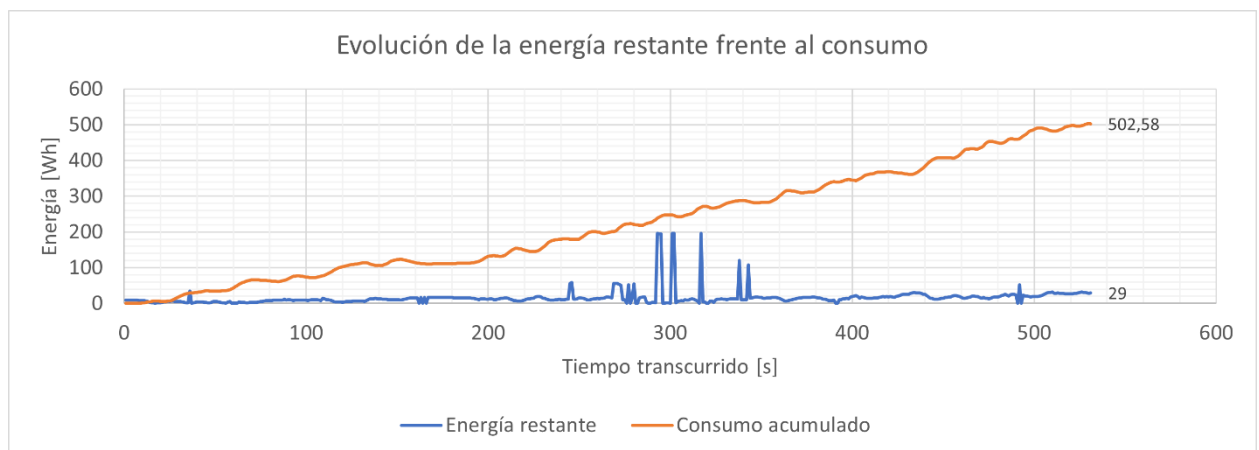
Como se puede ver existen varios puntos donde el valor de la energía que restará en la batería al finalizar cambia de manera muy abrupta. Esto tiene dos causas de error:

- Pérdida de información del GPS: cuando esto sucede no se realiza la predicción y ambas variables tienen valor 0.

- Error de diseño de ruta: algunas de las rutas (dentro de la “Ruta principal”) han sido diseñadas de tal manera que a veces se pasa por un mismo punto más de una vez. Esto supone una fuente de error a la hora de calcular en que punto de la ruta se encuentra el vehículo. Este cálculo se realiza cada segundo a partir de los datos de localización del GPS, se realiza una comparación entre la posición real del vehículo y los distintos puntos definidos de cada ruta, aquel punto con menor distancia al punto real será el que toma el modelo como el real para realizar la predicción.

Por tanto, al pasar varias veces por un mismo punto, ocurre que el modelo indica que le vehículo se encuentra en un punto que no es el real. De esta forma se erra en la predicción, si el modelo se equivoca y determina que el vehículo se encuentra en un punto más adelantado al real, el recorrido que resta es menor y por tanto una predicción de consumo menor a la realidad y viceversa.

En cuanto al primer error, la solución pasa por mantener la recomendación de retorno previa. Y en cuanto al segundo error, este es más difícil que se de en la realidad, ya que en una misma ruta no tendría mucho sentido pasar varias veces por un mismo punto.



*Figura 31. Consumo acumulado y energía restante al final del recorrido.*

El consumo total como se puede apreciar en la figura es de 502,58 Wh y el valor que indica el modelo de energía restante al final del recorrido es de 29. Lo cual indica que se debió haber comenzado la ruta con 531,58 Wh de energía en la batería, lo cual es muy parecido al valor que se le había dado (530 Wh).

En base a los resultados del ensayo se puede concluir que el modelo se comporta como esperado, predice de manera precisa el consumo y recomienda tomar el retorno adecuado teniendo en cuenta la energía de la que se dispone.

### ***Ensayo 10: Zero / Ruta principal / Predicción***

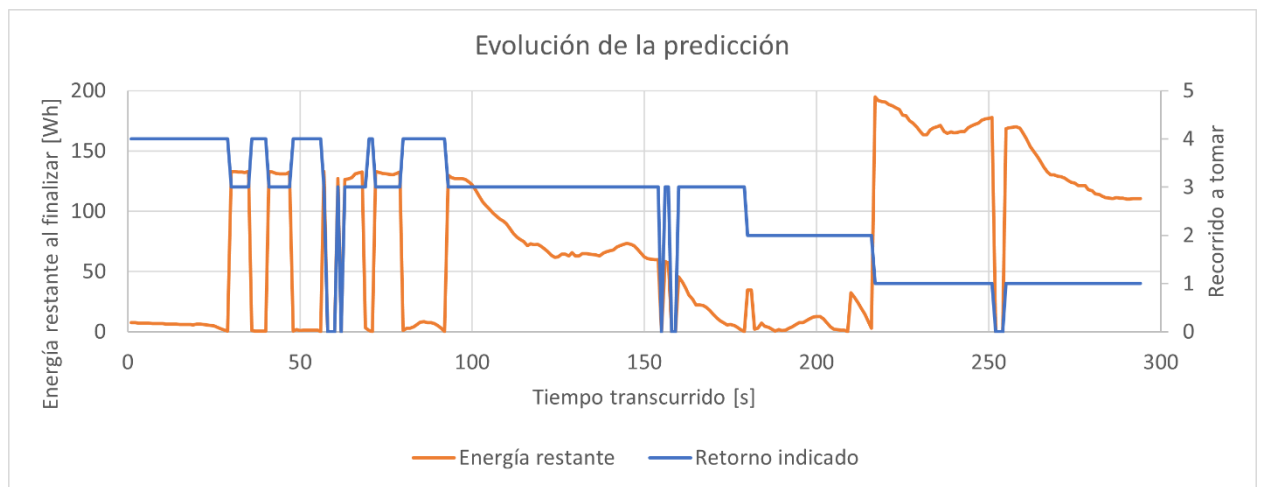
En este último ensayo se comprueba que el modelo valora todos los escenarios posibles.

Para ello se le va a informar de tener una energía en la batería suficiente (varios Wh sobrantes) para realizar la totalidad de la ruta. Una vez comenzada la ruta, se saldrá fuera de la ruta para gastar energía de manera continuada de tal forma que se pase por todos los escenarios posibles, siendo estos:

1. Posibilidad de completar la totalidad de la ruta
2. Posibilidad de completar R1+R2+R3 y coger el retorno 3.
3. Posibilidad de completar R1+R2 y coger el retorno 2.
4. Posibilidad de completar R1 y coger el retorno 1.

Al igual que en el ensayo anterior la ruta utilizada es la “Ruta principal” (no obstante, como se ha explicado, esta no se recorrerá en su totalidad).

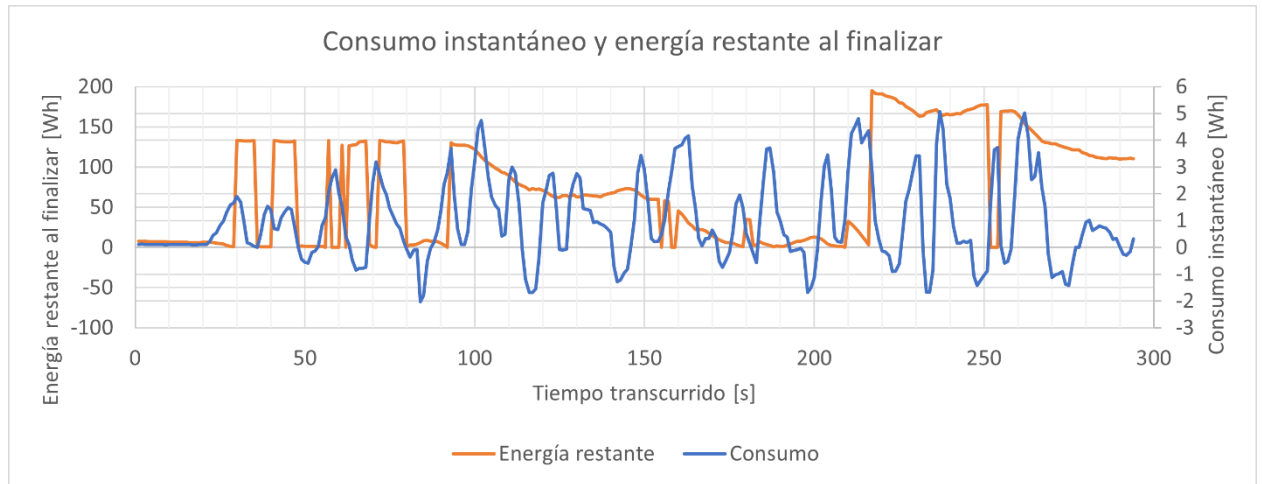
A continuación, los resultados del ensayo:



*Figura 32. Evolución de la predicción.*

Cuando la variable retorno indicado tiene valor  $n$ , quiere decir que se pueden recorrer todas las rutas hasta la ruta  $n$  incluida ( $R1+R2+\dots+Rn$ ) y el retorno  $n$  incluido. Se observan varias circunstancias atípicas en la figura, ya que se esperaba tener una evolución en forma de escalones descendentes muy bien marcados. Estos valores atípicos se deben a 2 circunstancias:

- Pérdida de información del GPS: este error ya ha sido comentado en el ensayo anterior.
- Problema relativo a la salida de la ruta: por como está diseñado el modelo de predicción, este, en todo momento debe encontrarse dentro de una ruta. En el caso de salirse de una ruta este modelo asume que se encuentra en el punto más cercano de la ruta en la que se encontraba antes de salirse. Al salirse de la ruta, se está recorriendo de manera ficticia un tramo de la ruta “R1” todo el rato, yendo hacia delante y hacia detrás repetidas veces. Esto hace que en algunos momentos se produzca una fluctuación entre el valor del retorno indicado, que se ve claramente al comienzo del ensayo entre 3 y 4.



*Figura 33. Consumo instantáneo vs energía restante al finalizar.*

En esta última figura se ve la relación entre el consumo instantáneo y la predicción de la energía que restará al final del recorrido. Se puede apreciar como la recuperación de energía (frenado regenerativo) se traduce en un aumento de la energía final restante.

Hay instantes donde esta energía restante al final del recorrido aumenta considerablemente y no se debe al frenado regenerativo. Esto es debido a que el modelo de predicción ha determinado que no queda energía suficiente para realizar la totalidad de la ruta y por tanto recomienda llevar a cabo el máximo número de rutas posibles con la energía que se tiene (pasando en primer lugar a poder realizar las 4 rutas a solo 3, después de 3 a 2 y así sucesivamente). En este cambio en el recorrido se pasa de no tener energía a tener un sobrante, si se lleva a cabo el recorrido que indica, de ahí esos cambios bruscos en la energía que restará al final del recorrido.

En base a los resultados de este ensayo se puede concluir que el modelo de predicción es adecuado y funciona correctamente. Se ha comprobado como este modelo valora e indica de manera acertada el recorrido a tomar en todo momento.

### **6.3. RESULTADOS**

A continuación, se recoge a modo resumen los resultados discutidos de cada ensayo. En primer lugar, se detallan los ensayos correspondientes al modelo de cálculo. Se distingue el vehículo y ruta utilizado, el parámetro objeto de estudio y si este supone una fuente de error y finalmente la modificación llevada a cabo en el modelo de cálculo.

<i>Ensayo</i>	<i>Vehículo</i>	<i>Ruta</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Fuente de error</i>	<i>Modificación</i>
1	Zylog	Ruta principal	-	No	-
2	Zylog	Ruta principal	-	No	-
3	Zylog	Ruta de velocidades	Altitud	Sí	Cambio en la fuente de datos
4	Zylog	Ruta de velocidades	Velocidad	No	-
5	Zylog	Ruta principal	Batería	No	-
6	Zylog	Ruta de giros y ruta de recta	Velocidad angular	No	-
7	Zero	Ruta de velocidades	-	No	-
8	Zero	Ruta principal	Rendimiento de motor	Sí	Se trabaja con rendimiento variable

*Tabla 9. Resultados de los ensayos correspondientes al modelo de cálculo.*

Finalmente se detallan los ensayos correspondientes al modelo de predicción.

<i>Ensayo</i>	<i>Vehículo</i>	<i>Ruta</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Funcionamiento del modelo</i>
9	Zero	Ruta principal	Predicción	Correcto
10	Zero	Ruta principal	Predicción	Correcto

*Tabla 10. Resultados de los ensayos correspondientes al modelo de predicción.*

## 7. CONCLUSIONES

Se ha conseguido el objetivo de comprobar y perfeccionar un sistema capaz de calcular el gasto energético de un vehículo eléctrico, consiguiendo de esta forma uno mucho más preciso y fiable. Se ha pasado desde un primer modelo en donde el error cometido era de 22,5 % hasta un modelo final cuyo error es del 1,68 %.

Esta mejora se ha llevado a cabo a través de la introducción de una fuente de información más precisa en cuanto al dato de altitud del terreno se refiere y a través de la introducción de la variación del rendimiento del motor. En ambos datos se ha visto que se estaba cometiendo un error a la hora de trabajar con ellos.

Se ha conseguido también el objetivo de creación de una función añadida de predicción a dicho sistema. Consiguiendo así fundar las bases para futuros estudios en la materia.

Las rutas diseñadas, así como los ensayos llevados a cabo han resultado ser los adecuados a la hora de aislar y estudiar todos los parámetros propuestos.

Las modificaciones realizadas en el modelo de cálculo han resultado ser correctas, mejorando así la precisión del modelo.

Se ha constatado la importancia en la precisión en la toma de datos, donde fuentes de datos que en un principio aparentaban fiables se ha comprobado que no lo son tanto. Suponiendo esto una fuente de error en el cálculo.

A la hora de construir un modelo preciso de cálculo de consumos y de predicción es muy importante conocer el comportamiento del motor del vehículo en todo momento.

Como líneas posibles de investigación se tiene la extrapolación del modelo predictor aquí construido para el caso de vehículos de particulares, donde obtener el dato de velocidad a lo largo de la ruta que se va a recorrer supone un mayor reto.

Profundizar más en cuanto al modelo de cálculo de consumo se refiere, donde se investigue la influencia del estado de salud de las baterías, se añada el consumo adicional de los elementos auxiliares de un vehículo y se estudie la influencia de diversos factores meteorológicos.

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] eea.europa.eu, <https://www.eea.europa.eu/ims/new-registrations-of-electric-vehicles>, fecha de acceso: 15/05/2023
- [2] ev-database.org, <https://ev-database.org/#sort:path~type~order=.rank~number~desc|range-slider-range:prev~next=0~1200|range-slider-acceleration:prev~next=2~23|range-slider-topspeed:prev~next=110~350|range-slider-battery:prev~next=10~200|range-slider-towweight:prev~next=0~2500|range-slider-fastcharge:prev~next=0~1500|paging:currentPage=0|paging:number=all>, fecha de acceso: 20/05/2023
- [3] commission.europa.eu, <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27>, fecha de acceso: 20/05/2023
- [4] acea.auto, <https://www.acea.auto/files/Research-Whitepaper-A-European-EV-Charging-Infrastructure-Masterplan.pdf>, fecha de acceso 21/05/2023
- [5] Wang, J., Besselink, I., & Nijmeijer, H. (2015). Electric vehicle energy consumption modelling and prediction based on road information. World Electric Vehicle Journal, 7(3), 447-458.
- [6] Kim, D., Shim, H. G., & Eo, J. S. (2022, June). A Machine Learning Method for EV Range Prediction with Updates on Route Information and Traffic Conditions. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (Vol. 36, No. 11, pp. 12545-12551).
- [7] Alfredo Santos Villafranca, “TFM: Desarrollo de una aplicación para determinar la autonomía en tiempo real de un vehículo eléctrico para el transporte de mercancías, equipado con panel fotovoltaico, BMS y GIS.”, Universidad de Zaragoza, 2021.
- [8] MATLAB R2022a.Ink, MathWorks.
- [9] ign.es, <http://www.ign.es/iberpix/visor>, fecha de acceso: 18/10/2022.
- [10] “Power Fase 145”, UQM Technologies, 2009.
- [11] J. F. Sanz Osorio, “Apuntes de Movilidad Eléctrica,” Universidad de Zaragoza, 2020.
- [12] Larminie, J., & Lowry, J. (2012). Electric vehicle technology explained. John Wiley & Sons.
- [13] “VMA430 GPS MODULE U-BLOX NEO-7M FOR ARDUINO®”, Velleman.
- [14] S. Horcas Esteban, “TFG: Análisis de prestaciones y consumo de energía de un vehículo eléctrico industrial para aplicaciones de logística de distribución urbana”, Universidad de Zaragoza, 2019.



- [15] User and Installation Manual, UQM Technologies, 2011.
- [16] Luis Rafael Navallas Dito, “TFG: Análisis del comportamiento y optimización de la configuración del modo de funcionamiento de un automóvil eléctrico de altas prestaciones”, Universidad de Zaragoza, 2016.

## ANEXO A. DATOS FIJADOS

### A.1. DATOS DE LOS VEHÍCULOS

#### Peso de los vehículos

Para la obtención de estos valores ambos vehículos fueron pesados.

#### Zylog



Figura 34. Pesaje del Zylog. Fuente: [7]

Con esto se tiene un peso en vacío del Zylog de 680 kg.

#### Zero



Figura 35. Valores de pesaje del Zero



*Figura 36. Pesaje del Zero*

Con esto se tiene un peso en vacío del Zero de 1840 kg.

#### Rendimiento de motor

Este parámetro en el modelo original se le dio un valor constante y de 0,85 %

### **A.2. VALOR DE LOS PARÁMETROS GENERALES**

#### Coefficiente de rodadura

Se ha empleado la misma ecuación del modelo original durante todo el trabajo, siendo esta dependiente del terreno y la velocidad:

$$C_r = C_{rdf} + C_{rdv} * v \quad ( 13 )$$

donde:

- $C_r$ : coeficiente de rodadura [-].
- $C_{rdf}$ : coeficiente de rodadura inicial [-], este al ser asfalto se le ha dado un valor de 0,02.
- $C_{rdv}$ : constante de variación de rodadura [(km/h) <sup>-2</sup>]
- $v$ : velocidad del vehículo.

#### Coefficiente aerodinámico

Este depende de la forma aerodinámica de cada vehículo. Ya que se desconoce el valor exacto de los coeficientes de ambos vehículos se ha supuesto de valor 0,5.

### Rendimiento de transmisión

En [10] se le da a un valor de 0.95 %, el cual se mantiene en ambos vehículos.

### Área frontal

Para el caso del Zylog este parámetro tiene un valor de 2,52 [ $m^2$ ].

Para el caso del Zero este parámetro tiene un valor de 2,75 [ $m^2$ ].

## **ANEXO B. ENSAYOS**

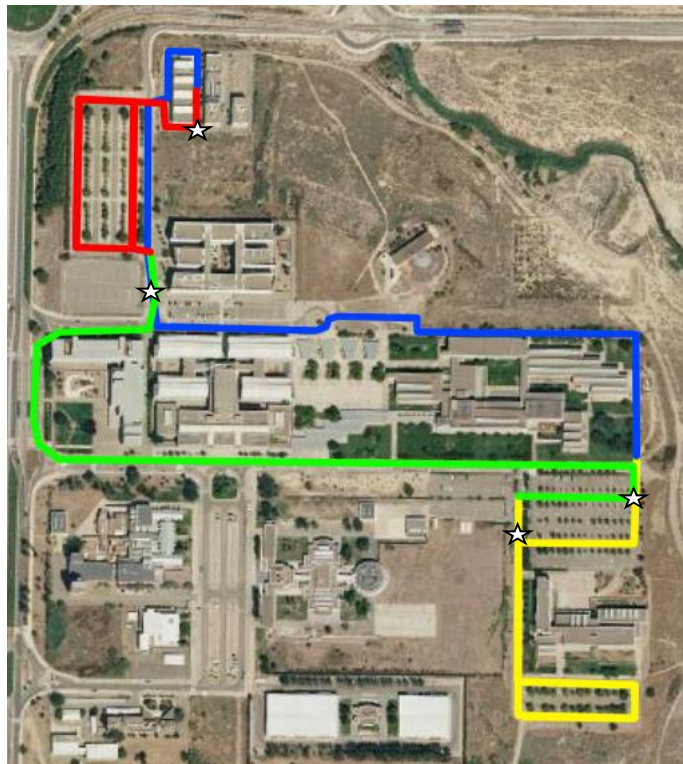
### ***B.1.RUTAS***

A continuación, vienen reflejadas las distintas rutas utilizadas en este trabajo.

#### **B.1.1. RUTA PRINCIPAL**

En primer lugar, se representa la totalidad de la ruta, es decir “R1”, “R2”, “R3” y “R4”. Luego vienen representadas cada ruta con su correspondiente retorno y finalmente los posibles escenarios (estos están relacionados con la parte de predicción, donde dependiendo de la energía que se tenga en la batería se podrá realizar un mayor o menor número de rutas), los cuales son:

- R1 + retorno 1
- R1 + R2 + retorno 2
- R1 + R2 + R3 + retorno 3
- R1 + R2 + R3 + R4 (Ruta principal)



*Figura 37. Ruta principal*

En la figura vienen diferenciadas las distintas rutas, donde las estrellas indican el comienzo de cada ruta (la ruta principal comienza y acaba en la estrella superior):

- R1 color azul
- R2 color amarillo
- R3 color verde
- R4 color rojo

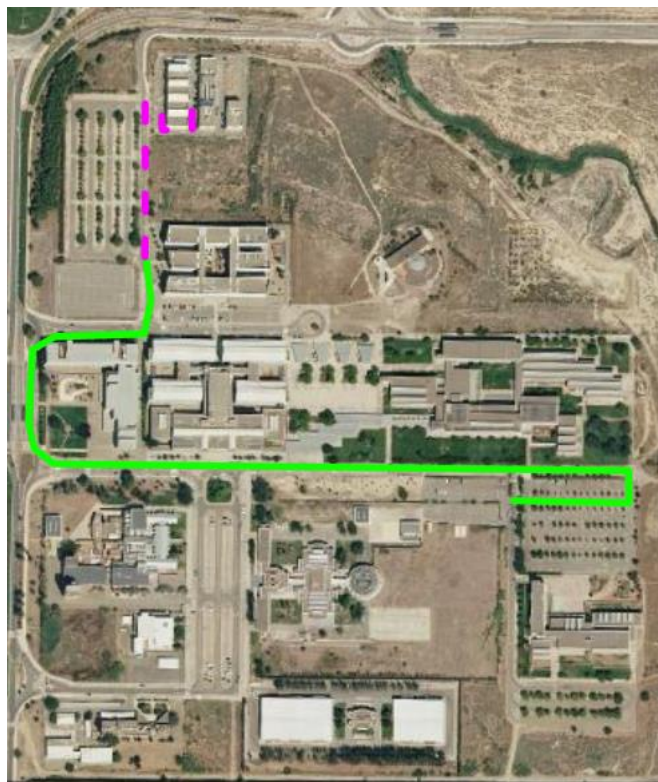




*Figura 38. R1 y retorno 1*



*Figura 39. R2 y retorno 2.*



*Figura 40. R3 y retorno 3.*

Posibles escenarios:

R1 + retorno 1 ya ha sido representado.

R1 + R2 + retorno 2:



*Figura 41. R1 + R2 + retorno 2*

R1 + R2 + R3 + retorno 3:



*Figura 42. R1+R2+R3+ retorno 3*

R1+R2+R3+R4 ya ha sido representada (Ruta principal)



### B.1.2. RUTA DE RECTA



*Figura 43. Ruta de recta.*

### B.1.3. RUTA DE GIROS



*Figura 44. Giro 25 y giro 12.5*

#### B.1.4. RUTA DE VELOCIDADES



*Figura 45. Ruta de velocidades*

#### ***B.2. MEDICIONES BATERÍA***

A continuación, vienen recogidas las mediciones de la batería al inicio y final de cada ensayo. Los datos de los ensayos llevados a cabo con el “Zylog” se representan separados a los del “Zero”.

El “Zylog” consta de 8 módulos de baterías de 6 V de tensión nominal de plomo ácido conectados en serie. Estas se localizan debajo de los asientos del vehículo y la disposición de estas viene representada siguiente figura:



Figura 46. Baterías del “Zylog”. Fuente: [7]

<i>Zylog</i>	$U_{bn1}$	$U_{bn2}$	$U_{bn3}$	$U_{bn4}$	$U_{bn5}$	$U_{bn6}$	$U_{bn7}$	$U_{bn8}$	$U_{bancada}$
<i>Ensayo 1 Inicio</i>	6,45	6,46	6,46	6,61	6,63	6,60	6,62	6,59	52,54
<i>Ensayo 1 Fin</i>	6,35	6,37	6,35	6,55	6,57	6,54	6,56	6,54	51,85
<i>Ensayo 2 Inicio</i>	6,15	6,17	6,10	6,30	6,31	6,28	6,32	6,28	50,13
<i>Ensayo 2 Fin</i>	6,11	6,13	6,10	6,29	6,30	6,27	6,31	6,27	49,84
<i>Ensayo 3 Inicio</i>	6,45	6,47	6,46	6,63	6,65	6,63	6,65	6,62	52,56
<i>Ensayo 3 Fin</i>	6,30	6,33	6,30	6,54	6,54	6,53	6,55	6,52	51,62
<i>Ensayo 4 Inicio</i>	6,14	6,16	6,13	6,33	6,33	6,31	6,35	6,31	50,05
<i>Ensayo 4 Fin</i>	6,05	6,11	6,06	6,27	6,27	6,25	6,29	6,26	49,58
<i>Ensayo 5 Inicio</i>	6,52	6,54	6,52	6,74	6,72	6,73	6,76	6,72	53,16
<i>Ensayo 5 Fin</i>	6,20	6,22	6,19	6,51	6,47	6,49	6,52	6,49	51,12
<i>Ensayo 6 Inicio</i>	6,29	6,27	6,30	6,52	6,50	6,50	6,55	6,51	51,46
<i>Ensayo 6 Fin</i>	6,12	6,11	6,12	6,42	6,37	6,40	6,45	6,40	50,44

Tabla 11. Valores de tensión en Voltios en los módulos de batería del Zylog antes y después de cada ensayo.

El “Zero” dispone de 106 módulos de baterías de  $\text{LiFePO}_4$  de 3,4 V de tensión nominal. Estas se encuentran repartidas entre la parte de atrás del vehículo y faldones de este. En la figura viene representada esta distribución.



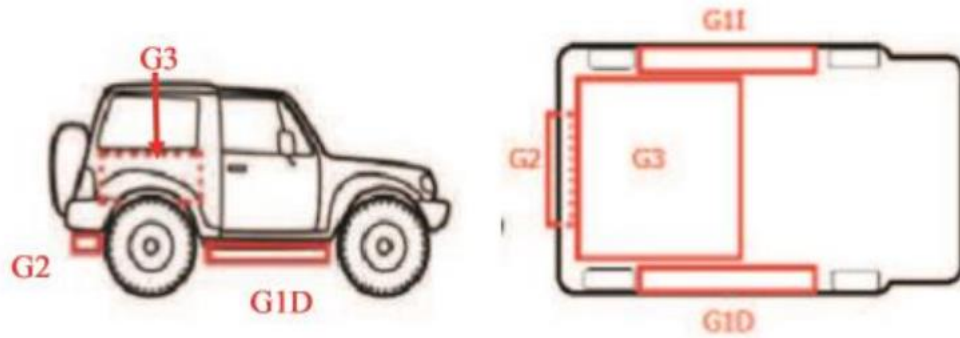


Figura 47. Distribución de las baterías en el "Zero". Fuente: [16]

La conexión entre todos los módulos viene representada a continuación:

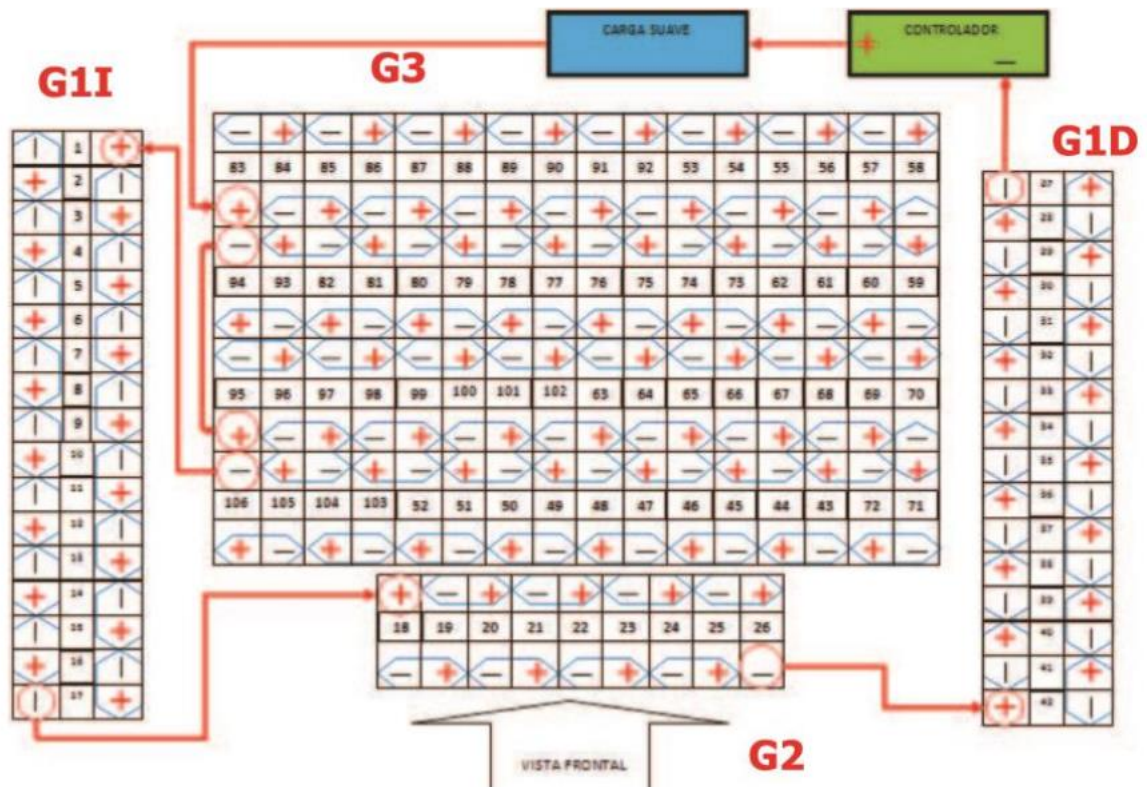


Figura 48. Conexión de los módulos de batería del "Zero". Fuente: [16]

La forma de tomar los datos de tensión es distinta, estos los aporta el propio sistema BMS del vehículo. A continuación, se puede ver de la interfaz del BMS donde entre otros datos aparece la tensión total y la de cada uno de los módulos.

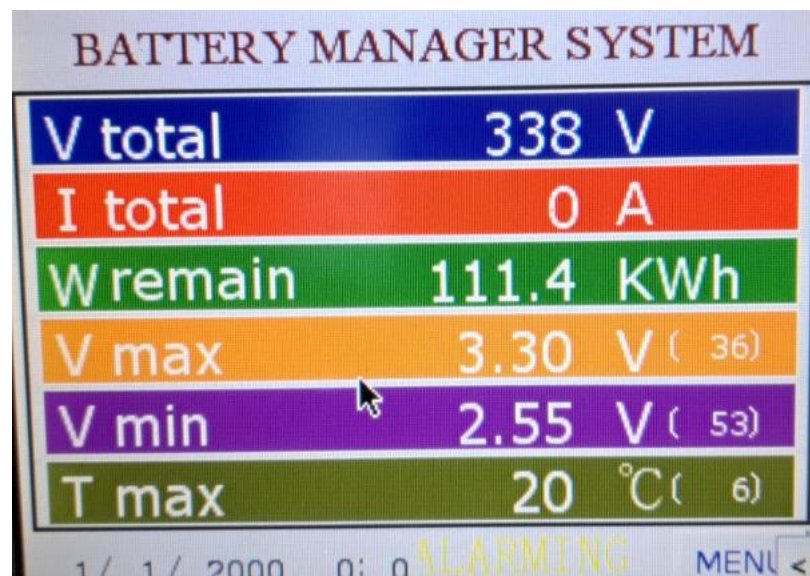


Figura 49. BMS Zero datos generales.

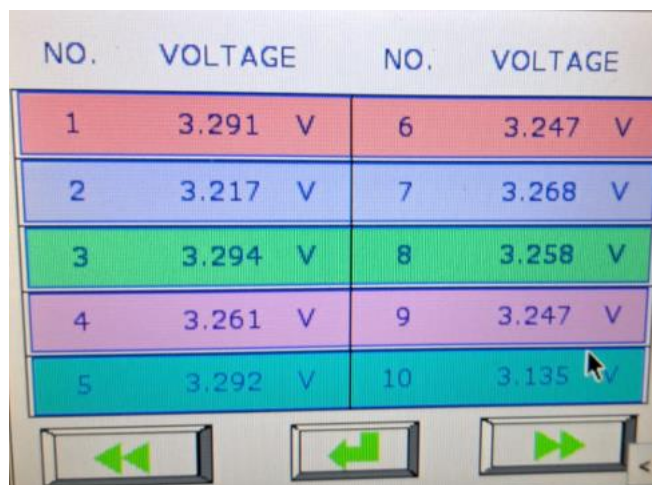


Figura 50. BMS Zero valor de la tensión en los módulos 1-10.



---

## ANEXO C. MODIFICACIÓN EN CUANTO AL RENDIMIENTO DEL MOTOR EN EL MODELO DE CÁLCULO DE CONSUMO

### C.1 MÉTODO DE TRABAJO

Como ya se ha mencionado, el trabajar con un rendimiento de motor constante supone una fuente de error ya que los requerimientos de par y velocidad (rpm) son cambiantes en todo momento y con ellos la eficiencia del motor.

Para eliminar dicha fuente de error se va a trabajar con un rendimiento variable, para ello se necesita contar con un mapa de eficiencia del motor trabajando como generador (frenados regenerativos) y motor. Ambos mapas de eficiencia se mostraron en las figuras 4 y 5.

Se va a construir una herramienta que permita trabajar en cierto modo con los datos de sendos mapas de eficiencia. Para ello se va a tomar ciertos puntos del mapa de eficiencia, para a partir de estos puntos realizar la interpolación lineal.

El propio Matlab tiene una función capaz de realizar esta interpolación lineal en 2 dimensiones llamada “interp2”, además dicha función permite trabajar con varios métodos de interpolación como son: método del vecino más cercano, lineal, método de splines, etc. Se ha optado por trabajar con el método lineal ya que arroja una buena precisión.

### C.2 CÓDIGO IMPLEMENTADO

En este apartado se detalla el código en Matlab, como al modelo de cálculo (capaz de calcular el consumo segundo a segundo) se le añade una función capaz de determinar la eficiencia del motor en cada momento.

```
function [Dat_Mot] = Mapa_motor(~)

    Dat_Mot.E_mot = [ 73 73 73 73 73 73 73 73 73;
                      74 82 86 87 89 86.5 85 84 82;
                      75 85.5 89.8 91 92.7 91.5 90.3 90 89;
                      73 85.2 90.2 92.2 93 92.8 91 91 91;
                      72 84.5 90 92.4 93.5 93 91 91 91.5;
                      72 82.5 89 92.1 93.5 92.8 92 NaN NaN;
                      72 81.5 88.5 91.5 92.7 93 NaN NaN NaN;
                      72 79 87.3 90 92 NaN NaN NaN NaN;
                      72 77 86 90 NaN NaN NaN NaN NaN;           %eficiencia como motor
                      ];
    Dat_Mot.E_gen = [73 73 73 73 73 73 73;
                     73 80 90 90.5 90.5 87.5 83;
                     NaN NaN 88.5 92 93.5 92 90;
                     NaN NaN 85 92 94 93.5 92;
```

```

NaN NaN NaN 90 93 93 93;
NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN;
NaN NaN NaN NaN NaN NaN NaN;];           % eficiencia como
generador

% A continuación se definen los puntos del mapa escogidos

Dat_Mot.Xgen =[0 1000 2000 3000 4000 5000 6000];           % eje X del mapa
generador
Dat_Mot.Xmot =[0 1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000];% eje X del mapa motor
Dat_Mot.Ygen =[0 25 50 75 100 125 150];           % eje Y del mapa
generador
Dat_Mot.Ymot =[0 50 100 150 200 250 300 350 400];           % eje Y del mapa motor

end

```

Esta función sirve como definición de todos los puntos utilizados para construir el mapa de eficiencias trabajando tanto como motor y como generador. El cálculo de la eficiencia se realiza de la siguiente manera (donde a partir del par y velocidad del motor en rpm se obtiene la eficiencia en cada punto):

```

M{ii}{i,"Ef"} =
interp2(Dat_Mot.Xmot,Dat_Mot.Ymot,Dat_Mot.E_mot,M{ii}{i,"RPM"},M{ii}{i,"Par"},"linear
"); % calculo de la eficiencia

```