



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Instalación y ensayo de un sistema de adquisición de energía mediante placas fotovoltaicas en vehículo eléctrico industrial para aplicaciones de logística de distribución urbana

Installation and testing of an energy acquisition
system using photovoltaic panels in an industrial
electric vehicle for urban distribution logistics
applications

Autor

Jorge Ferrer Luzón

Directores

Emilio Larrodé Pellicer

Juan Bautista Arroyo García

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2021-2022

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Gloria y a mis compañeros de carrera y de MotoStudent Unizar.

Gracias.

Movilidad sostenible en la logística de distribución urbana

RESUMEN

En el siguiente trabajo se llevan a cabo una serie de ensayos, tanto teóricos como experimentales, que buscan cuantificar el impacto de un sistema de adquisición de energía fotovoltaica en las prestaciones de un pequeño vehículo de distribución urbana.

Para ello se instalan cuatro paneles solares en el techo del vehículo y se realiza un seguimiento de su telemetría a lo largo de un trayecto predefinido.

Estos datos se introducen en una simulación por ordenador que devuelve los consumos y ahorros energéticos del vehículo. Dichos consumos también se obtienen de forma experimental, dando validez al modelo teórico.

De esta manera, en este se plantearán una serie de conclusiones acerca de la viabilidad de este tipo de sistemas en vehículos pequeños con rutas de corta distancia.

Índice

1. Objeto, justificación y alcance	1
1.1. Objeto	1
1.2. Justificación	1
1.3. Alcance	1
2. Introducción y antecedentes	3
2.1. La energía solar en el transporte	3
2.2. Antecedentes	6
2.2.1. Zytel y el vehículo Zylog	6
2.2.2. Estudios previos	6
3. Descripción del trabajo	7
3.1. Estudio teórico	7
3.2. Estudio experimental	8
4. Metodología	13
4.1. Dinámica de un automóvil	13
4.2. Cálculo de consumos	15
4.2.1. Consumo base del Zylog	15
4.2.2. Energía del frenado regenerativo	16
4.2.3. Energía de los paneles solares	16
4.3. Toma de datos experimentales	17
5. Ensayos experimentales	21

5.1. Ensayo 1: Pendiente	21
5.2. Ensayo 2: Zig Zag	24
5.3. Ensayo 3: Circuito completo	26
5.3.1. Descripción del recorrido y gráfica de velocidad	26
5.3.2. Cálculo y corrección de las pendientes	28
5.3.3. Carga solar	32
5.3.4. Medida experimental de parámetros energéticos	34
6. Modelo teórico en MatLab	37
6.1. Introducción de datos	37
6.2. Simulaciones numéricas	38
6.2.1. Ensayo 1: Pendiente	39
6.2.2. Ensayo 2: Zig Zag	41
6.2.3. Ensayo 3: Circuito completo	43
7. Validación y comparación	45
7.1. Validación del modelo mediante comparación de potencias	45
7.2. Comparación de resultados	46
8. Resultados y conclusiones. Futura continuación	49
8.1. Resultados y conclusiones	49
8.2. Futura continuación	49
Bibliografía	51
Anexos	58
A. Diseño y fabricación de los dispositivos de sujeción	61
A.1. La problemática en la colocación de los paneles solares	61
A.2. Diseños de sujeción	63
A.2.1. Diseño n.º 1	63
A.2.2. Diseño n.º 2	65

A.2.3. Diseño n.º 3	67
A.3. Fabricación de los elementos de sujeción e instalación de los paneles solares	69
A.3.1. Sujeciones de aluminio	69
A.3.2. Soportes centrales	72
A.3.3. Instalación de los paneles solares	73
B. Funcionamiento del diagrama de bloques en Simulink	77
B.1. Definición de variables	77
B.2. Introducción	78
B.3. Funcionamiento detallado del modelo desarrollado	80
B.3.1. Entradas de datos	81
B.3.2. Cálculos	82
B.3.3. Resultados	90
C. Elementos comerciales	93

Capítulo 1

Objeto, justificación y alcance

1.1. Objeto

Este proyecto consiste en la instalación de un sistema de adquisición de energía fotovoltaica en un pequeño vehículo eléctrico de distribución urbana. Además, se definirá un modelo numérico para dicho vehículo y se realizarán una serie de ensayos para cuantificar el impacto de este sistema de ahorro. Posteriormente, se compararán los resultados obtenidos experimentalmente y los arrojados por las simulaciones.

1.2. Justificación

Todo el siguiente trabajo está motivado por la creencia de que la instalación de paneles solares en este tipo de vehículos podría mejorar notablemente la eficiencia de sus recorridos, haciéndolos una alternativa limpia, eficiente y silenciosa para la entrega de mercancías en las ciudades.

1.3. Alcance

El proyecto empieza por la definición de ambas secciones del trabajo: el cálculo mediante simulación y la obtención de datos experimentales.

En primer lugar, se describe el modelo teórico a utilizar y se presentan el diseño y montaje de la instalación solar en el techo del vehículo.

Posteriormente, se definen los ensayos a realizar y se presentan los datos obtenidos experimentalmente.

Después, se realizan estos mismos ensayos en un entorno virtual y se obtienen unos resultados.

Finalmente, se comparan ambos resultados y se extraen unas conclusiones.

Capítulo 2

Introducción y antecedentes

2.1. La energía solar en el transporte

En 1839 Edmond Becquerel desarrolló la primera célula fotovoltaica. Más de cien años después, en 1954, los Laboratorios Bell anunciaron el panel solar tal y como lo conocemos en la actualidad. Su uso fue inicialmente exclusivo a la industria aeroespacial, debido a su alto precio. [1]

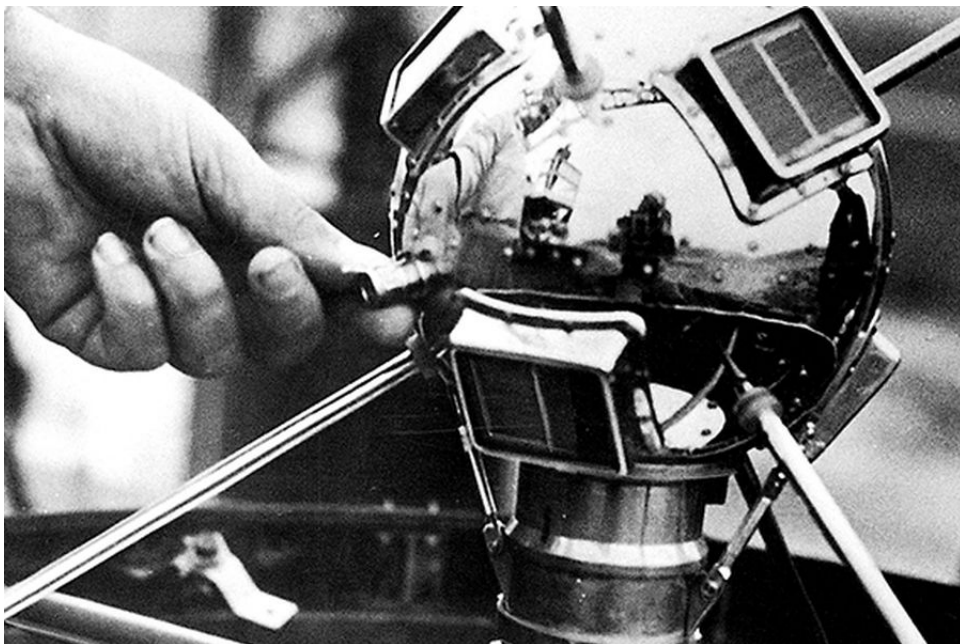


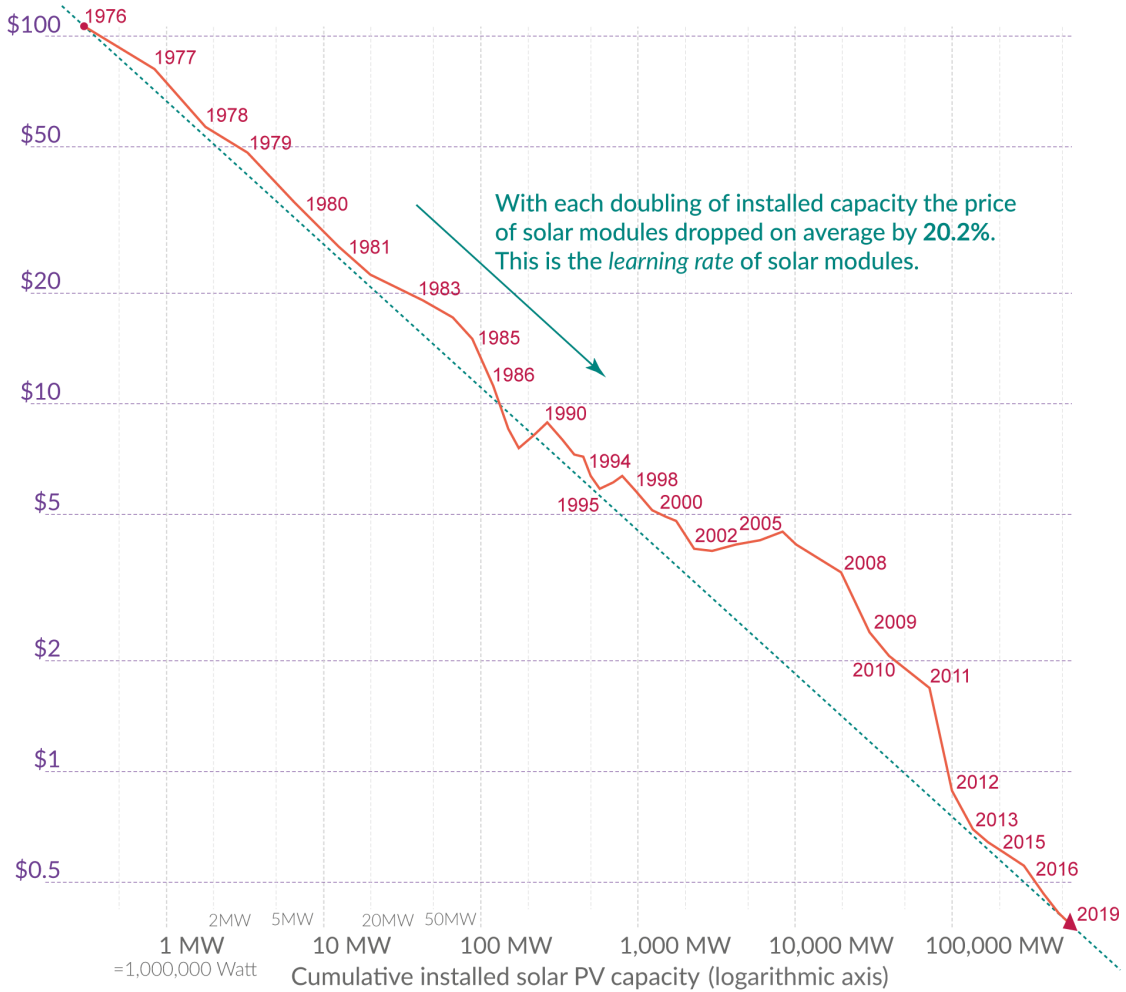
Figura 2.1: El Vanguard 1.

Fue el cuarto satélite puesto en órbita en la historia y el primer artificio en hacer uso de la energía solar en el espacio. [2]

Sin embargo, durante las siguientes décadas el precio de la energía solar sufrió una bajada gradual muy significativa gracias a los diversos esfuerzos en la investigación de esta nueva tecnología. [3]

The price of solar modules declined by 99.6% since 1976 Our World in Data

Price per Watt of solar photovoltaics (PV) modules (logarithmic axis)
The prices are adjusted for inflation and presented in 2019 US-\$.



Data: Lafond et al. (2017) and IRENA Database; the reported learning rate is an average over several studies reported by de La Tour et al (2013) in Energy. The rate has remained very similar since then.
OurWorldinData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the author Max Roser

Figura 2.2: Caída en dólares del precio por vatio en módulos solares desde 1976 a 2019. El eje inferior indica la capacidad total instalada en tecnología fotovoltaica en MW. Fuente: <https://ourworldindata.org/>

En la actualidad la energía fotovoltaica tiene usos muy diversos, siendo uno de ellos su aplicación a los medios de transporte.

El uso de paneles solares está aplicado en vehículos como:

- **Barcos**, en sistemas de protección catódica y para la carga de sus baterías.
- **Aviones** como el *Solar Impulse* [4], avión experimental que se alimenta únicamente de energía solar fotovoltaica. Sus alas, de gran envergadura, están cubiertas en su totalidad por células fotovoltaicas y, al estar equipado con baterías, puede volar por la noche, haciendo esto su autonomía casi ilimitada.
- **Automóviles**, donde esta tecnología ocasionalmente da energía al sistema de aire acondicionado o permite cargar las baterías. También existen automóviles de propulsión enteramente solar, son los llamados *vehículos solares* que, a menudo, compiten en carreras como la *World Solar Challenge*.

Es en el uso de la carga de baterías de automóvil eléctrico en el que este trabajo basa sus esfuerzos.



Figura 2.3: Prototipo solar del Toyota Prius PHV.

Este automóvil cuenta con paneles solares en la mayor parte de su planta, declarando una generación de potencia eléctrica de 860 W.

2.2. Antecedentes

2.2.1. Zytel y el vehículo Zylog

Zytel es una empresa aragonesa dedicada al diseño y fabricación de vehículos eléctricos que nace de la colaboración del Grupo Zytech con la Universidad de Zaragoza. Dentro de esta iniciativa, surge el vehículo Zylog, que se presenta como un medio logístico de reparto urbano.

El Zylog es un vehículo homologable que entraría dentro de la categoría de Cuatriciclo Pesado. Cuenta con un asiento de dos plazas y una zona de carga en la parte trasera. Debajo del asiento se encuentran 8 baterías de plomo conectadas en serie que proporcionan una tensión nominal de 48V.



Figura 2.4: Vehículo Zylog.

Pequeño vehículo eléctrico desarrollado por la aragonesa Zytel en colaboración con la Universidad de Zaragoza.

2.2.2. Estudios previos

Existen dos proyectos estudiantiles dentro de la EINA que preceden a este trabajo. Se trata de los Trabajos de Fin de Grado de Francisco Javier Granado Alfonso [5] y Sergio Horcas Esteban [6] que, en 2018 y 2019, llevaron a cabo esfuerzos de naturaleza similar al expuesto a continuación.

En los siguientes capítulos se buscará expandir los procedimientos, métodos y ensayos realizados anteriormente por mis compañeros, dando pie a que, en el futuro, otro estudiante continúe este trabajo.

Capítulo 3

Descripción del trabajo

Este proyecto tiene como objetivo investigar y cuantificar el efecto de la instalación de un sistema de adquisición de energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos en el vehículo de ensayo Zylog.

Para ello se llevan de manera paralela dos formas de estudio: una teórica y otra experimental. Esto permite comparar los resultados calculados con los medidos, validando así un modelo teórico extrapolable a otros vehículos con instalaciones solares diversas.

3.1. Estudio teórico

La parte teórica de este trabajo consiste en el diseño de un diagrama de bloques en Simulink. Simulink es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación MATLAB. Este diagrama tiene como función el cálculo de consumos a partir de la entrada de telemetría del vehículo Zylog, ya sea arbitraria u obtenida en un ensayo.

Las entradas de datos se encuentran en el lado izquierdo del esquema y, en la figura 3.1, están remarcadas en rojo. En el lado contrario, remarcadas en verde, se encuentran las salidas, que recogen consumos con y sin paneles solares y otros datos relacionados con el estudio. En la parte central quedan reflejados los distintos procesos de cálculo.

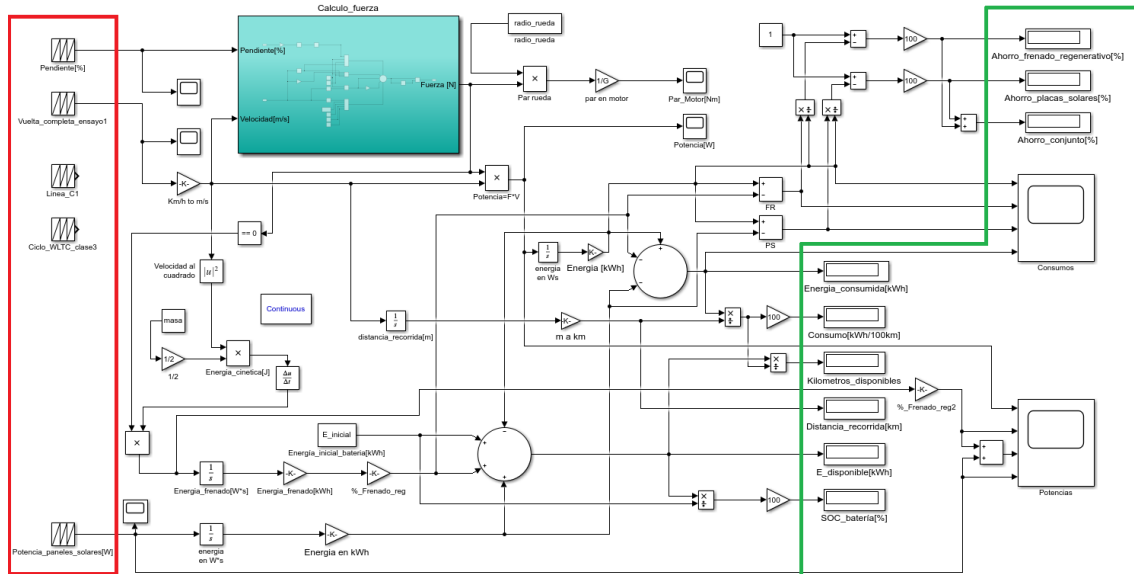


Figura 3.1: Diagrama de bloques en Simulink.
 En rojo: entrada de datos, en verde: resultados.

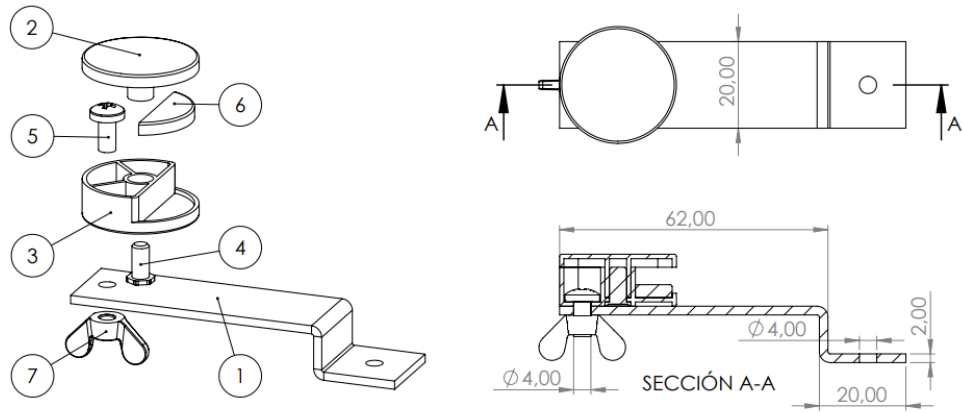
El **Anexo B** consiste en una descripción detallada del funcionamiento de este diagrama y resulta muy recomendable leerlo para entender cómo se calculan los distintos resultados mostrados en capítulos posteriores.

3.2. Estudio experimental

La parte experimental consiste en la realización de varios ensayos, conduciendo el vehículo por distintos circuitos predefinidos y recopilando datos telemétricos y de consumo.

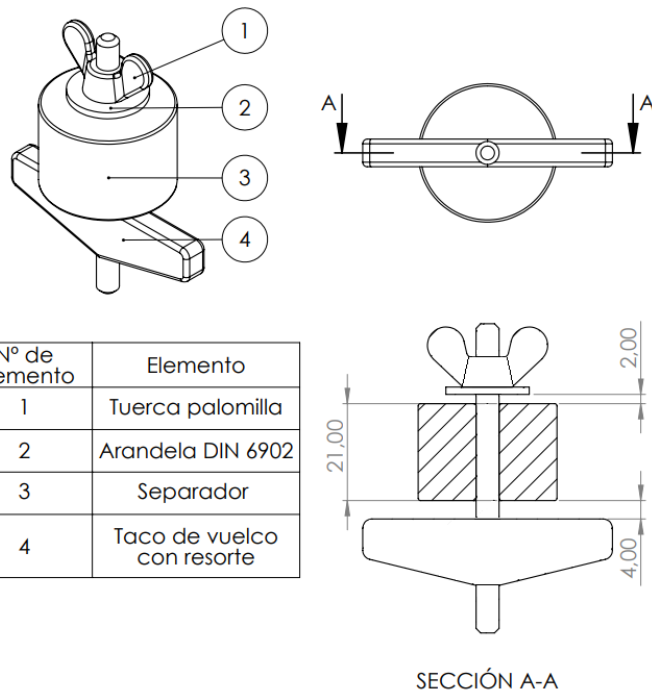
Para ello, es imprescindible seleccionar y montar unos paneles solares que se adapten a la geometría del techo del Zylog. Se seleccionan cuatro paneles solares semi-rígidos de la marca RED SOLAR y de potencia máxima 60x4W. Hay más información sobre ellos en los **Anexos C**.

Una vez seleccionados los paneles, es necesario instalarlos correctamente sobre el techo del vehículo. Esto se realiza empleando unas piezas de sujeción mostradas en las figuras 3.2 y 3.3. Los **Anexos A** están dedicados al diseño y fabricación de estos soportes.



N.º de elemento	Elemento	Material
1	Perfil doblado	Aluminio
2	Tapa pieza sujeción	Zinc
3	Base pieza sujeción	Zinc
4	Tornillo de apriete	Acero
5	Tornillo de posición	Acero
6	Ventosa antideslizante	Silicona
7	Tuerca de mariposa	Acero

Figura 3.2: Soportes laterales empleados para sujetar los paneles solares. Se fabrican a partir de una pieza comercial y un perfil de aluminio.



Nº de elemento	Elemento
1	Tuerca palomilla
2	Arandela DIN 6902
3	Separador
4	Taco de vuelco con resorte

Figura 3.3: Soportes centrales. Estas piezas se colocan entre los paneles para dar apoyo al conjunto.

El proceso de diseño de los soportes pasa por plasmar en CAD el techo del vehículo. A continuación, se prueban diferentes diseños y seleccionan, finalmente, los ya descritos.

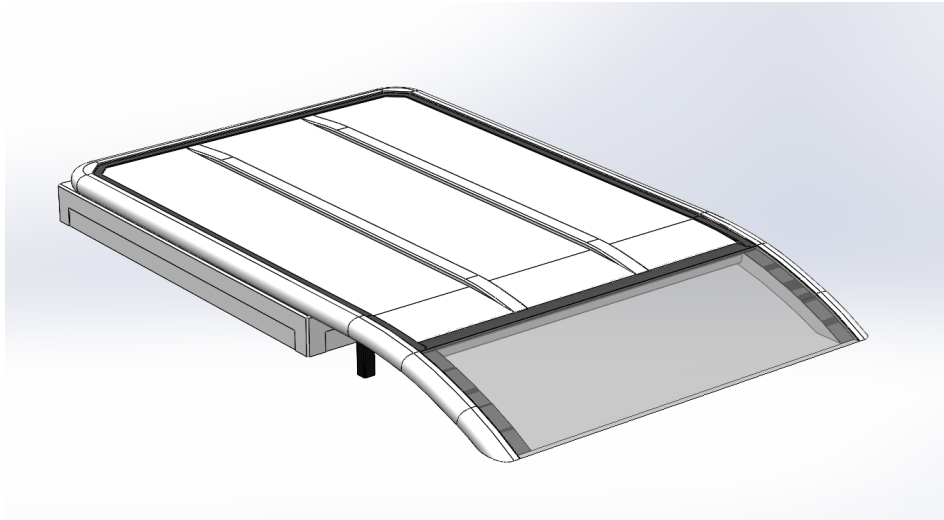


Figura 3.4: Modelo 3D del techo del Zylog.
Se emplea el software SolidWorks y medidas tomadas a mano.

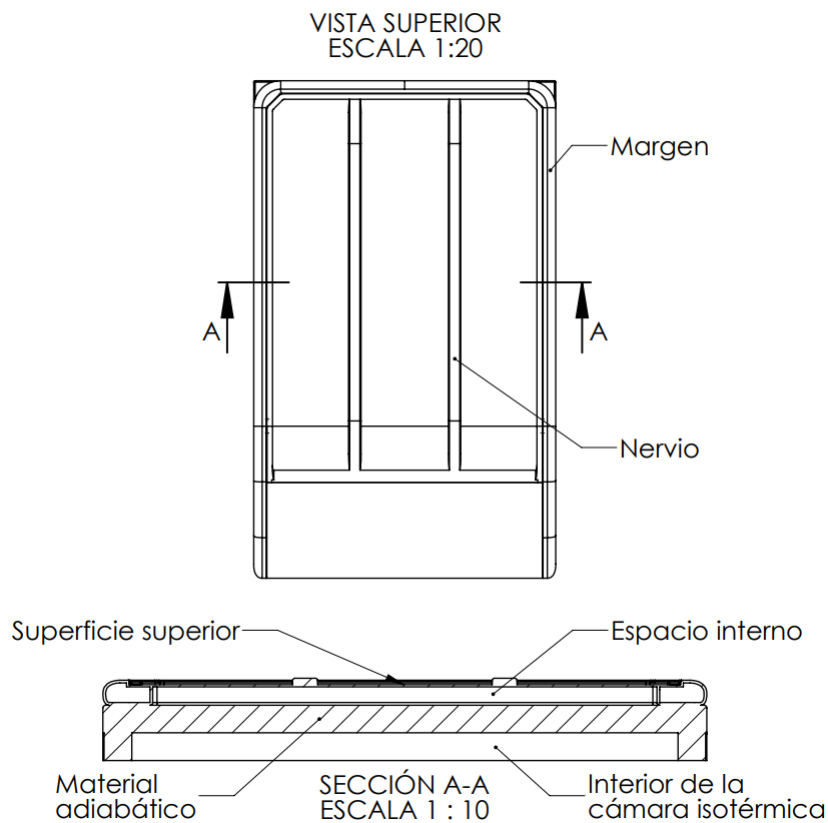


Figura 3.5: Vistas del techo.
El Zylog cuenta con un espacio debajo de su techo al cual no se tiene acceso por razones geométricas. Es importante tenerlo en cuenta a la hora de diseñar los soportes centrales.

En las figuras 3.6 y 3.7 se puede apreciar el resultado final de la instalación del sistema de adquisición de energía solar.

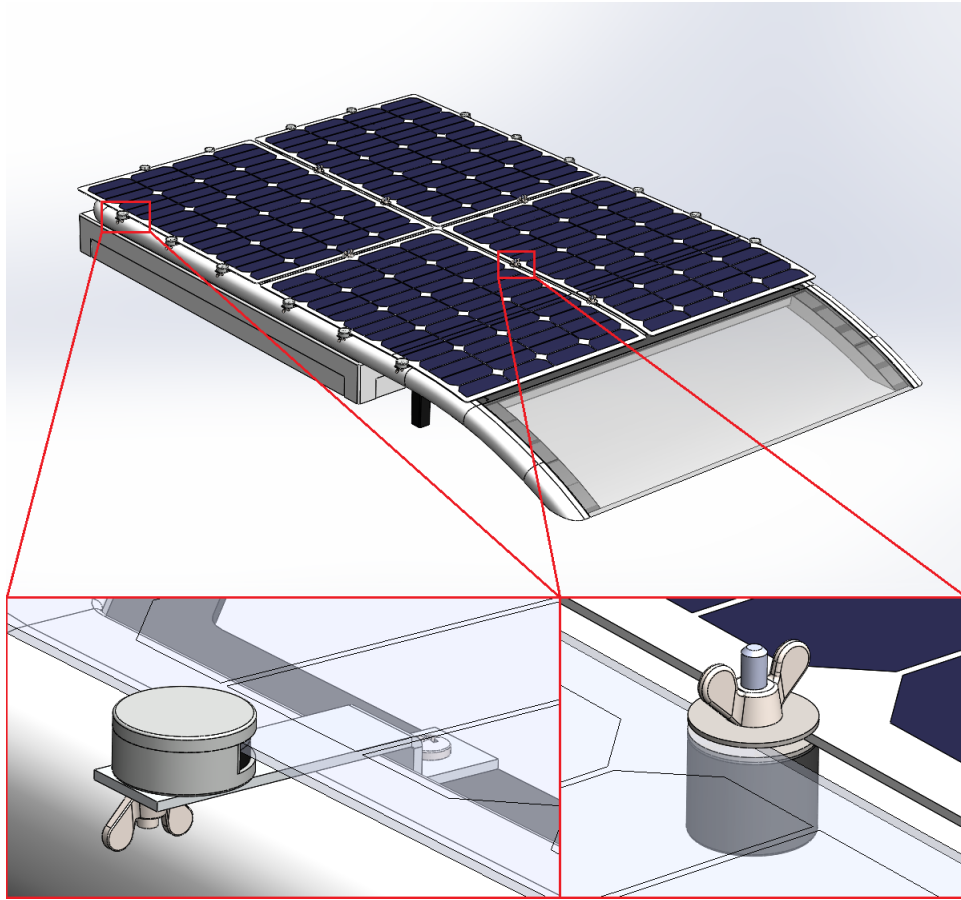


Figura 3.6: Modelo 3D del techo del Zylog con los cuatro paneles solares instalados. Se sujetan lateral y centralmente empleando soportes de diseño propio.



Figura 3.7: Paneles solares instalados en el Zylog. Se instalan en serie-paralelo para adecuarlos a la tensión admitida por el cargador solar.

Además, los paneles se conectan con las baterías a través de un cargador solar MPPT de la marca Victron Energy siguiendo el esquema de la figura 3.8, expuesta a continuación. El cargador solar recibe corriente de los paneles solares a una tensión nominal superior a la de la batería y la convierte a la tensión de la batería, cargándola con una corriente que llegue hasta su valor nominal.

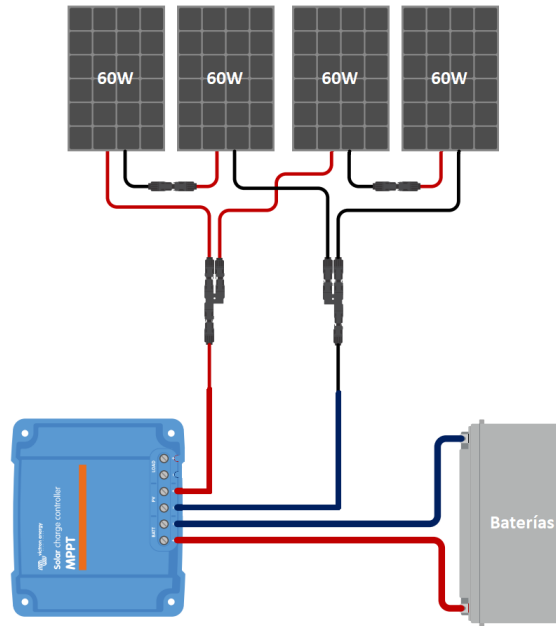


Figura 3.8: Conexión de los paneles, cargador solar y batería. El cargador solar convierte la energía recibida de los paneles solares a la tensión de la batería con una corriente que llegue hasta su valor nominal.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Dinámica de un automóvil

Para llevar a cabo los objetivos de este proyecto es necesario conocer cómo funciona la dinámica de un automóvil.

Esta está comprendida por una serie de fuerzas que afectan al movimiento del vehículo y que modelan su comportamiento cinemático.

Pueden entenderse estas fuerzas como las que se oponen al movimiento del vehículo, siendo la fuerza total a vencer para una velocidad y aceleraciones dadas el sumatorio de todas ellas.

$$(F_t - F_f) = F_{sp} + F_{rr} + (F_{il} + F_{ia}) + F_a \quad (4.1)$$

Siendo:

- $F_t[N]$, la fuerza de tracción. Esta fuerza comprende el esfuerzo que realizan los neumáticos sobre el suelo, proporcionado por el motor.
- $F_f[N]$, la fuerza de frenado. Esta fuerza comprende el esfuerzo que realizan los neumáticos sobre el suelo (en dirección contraria a F_t), proporcionado los frenos.
- $F_{sp}[N]$, la fuerza de superación de la pendiente.
- $F_{rr}[N]$, la fuerza de resistencia a la rodadura.
- $F_{il}[N]$, la fuerza de inercia lineal.
- $F_{ia}[N]$, la fuerza de inercia angular.
- $F_a[N]$, la fuerza aerodinámica.

A continuación, se exponen las ecuaciones que definen estas fuerzas:

Fuerza de superación de la pendiente (F_{sp}). La fuerza de superación de la pendiente viene determinada por la inclinación del terreno sobre el que se encuentra el vehículo en un momento dado.

$$F_a = m * g * \text{sen}\alpha \quad (4.2)$$

Siendo α [$^\circ$] el ángulo de inclinación del terreno, g [m/s^2] la aceleración de la gravedad y m [kg] la masa del vehículo.

Fuerza de resistencia a la rodadura (F_{rr}). Esta fuerza representa la resistencia que ofrece el contacto de las ruedas con el asfalto al movimiento del vehículo.

$$F_{rr} = N * C_{rr} \approx m * g * C_{rr} \quad (4.3)$$

Siendo C_{rr} el coeficiente de rodadura y N la fuerza normal que aplica el vehículo sobre el terreno.

Además, se asumen ángulos de inclinación del terreno pequeños, por lo que $\cos \alpha \approx 1$ y $N \approx m * g$

Fuerzas de inercia ($F_{il} + F_{aa}$). Se tratan de las fuerzas necesarias para acelerar el vehículo.

F_{il}] cuantifica la fuerza necesaria para acelerar las masas fijas y se define mediante la siguiente fórmula:

$$F_{al} = m * a \quad (4.4)$$

Siendo a [m/s^2] la aceleración del vehículo en un instante de tiempo dado.

F_{ia} define la fuerza extra que debe aportarse para vencer la inercia angular de las ruedas y demás partes rotativas. Se considera que la fuerza de inercia angular (F_{aa}) es un 5 % de la fuerza de inercia lineal. [7]

Fuerza aerodinámica (F_a). Es la fuerza resistente que ofrece el aire sobre el vehículo.

$$F_a = 1/2 * v^2 * \rho_a * S_f * C_x \quad (4.5)$$

Siendo $v[m/s]$ la velocidad del vehículo, $\rho_a[kg/m^3]$ la densidad del aire, $S_f[m^2]$ la superficie frontal del vehículo y C_x el coeficiente aerodinámico del mismo.

Además, de aquí en adelante, ($F_t - F_f$) será F_t por motivos de simplicidad en los cálculos.

4.2. Cálculo de consumos

4.2.1. Consumo base del Zylog

Una vez es conocida la fuerza total del vehículo, también llamada fuerza de tracción, es posible conocer la potencia que este desarrolla en cada momento de tiempo.

A partir de aquí, integrando, puede deducirse el consumo del vehículo de estudio. Este sería el consumo sin incluir ninguno de los dos sistemas de ahorro que posee el Zylog: frenado regenerativo y paneles solares.

$$E = \int_{t=0}^{t=t_f} F_t * v \cdot dt \quad (4.6)$$

Siendo t_f el instante final de la simulación, F_t la fuerza de tracción del vehículo y v la velocidad del mismo.

Es importante saber que solo deben considerarse los valores positivos de F_t tal y como se indica en la figura B.11.

4.2.2. Energía del frenado regenerativo

Para el cálculo de la energía proporcionada por el frenado regenerativo es necesario conocer la energía cinética del vehículo, pues se ha considerado que, cuando la fuerza de tracción es cero, se activa este sistema y las baterías recibirán un porcentaje preestablecido de la energía cinética que se esté "perdiendo".

Se puede expresar este procedimiento mediante la siguiente condición:

$$F_t = 0 \quad (4.7)$$

Y cumpliendo la siguiente expresión:

$$E_{fr} = K_{fr} * \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (4.8)$$

Siendo K_{fr} el porcentaje de la energía que se recupera con el frenado regenerativo.

Para realizar correctamente estos cálculos en el diagrama de Simulink, es importante tener en cuenta las consideraciones de la figura B.13.

4.2.3. Energía de los paneles solares

La energía producida por los paneles solares se calcula integrando la potencia suministrada por los mismos en el periodo de tiempo del ensayo.

$$E_{ps} = \int_{t=0}^{t=t_f} P_{ps} \cdot dt \quad (4.9)$$

Siendo P_{ps} la potencia generada por los paneles solares en un instante de tiempo dado.

La implementación en Simulink de este procedimiento se encuentra representado en la figura B.14.

4.3. Toma de datos experimentales

Los ensayos experimentales se realizan en días soleados y en torno a las 13:00 h con la intención de sacar el máximo partido al sistema de carga solar.

Se decide realizar tres ensayos diferentes que simulen distintas situaciones a las que el Zylog se pueda enfrentar en su rutina de reparto. Dichos ensayos son los siguientes:

- **Ensayo de pendiente**, que se realiza en la rampa de salida del aparcamiento norte de edificio Ada Byron, de la EINA. Su objetivo es cuantificar el impacto de pendientes pronunciadas en el consumo del vehículo.
- **Ensayo de zigzag**, que tiene lugar entre las naves contiguas. Este ensayo permite realizar muchas aceleraciones y frenadas en un intervalo corto de tiempo.
- **Circuito completo**, rodeando el campus, simula una ruta de reparto corta pero realista.



Figura 4.1: Localización del ensayo de pendiente.
Fuente: Google Maps.

El procedimiento de realización de los ensayos es el siguiente:

1. Inicialmente, solo está conectada la alimentación de la placa de sensores (+ el consumo residual del Zylog).
2. Se INICIA REGISTRO,
3. Se conecta el regulador solar.
4. Se conectan los paneles al regulador solar.
5. Se saca el Zylog a la calle sin arrancarlo.
6. Se arranca el Zylog.
7. Se realizan los ensayos pertinentes.
8. Se devuelve el Zylog a la nave,
9. Se desconecta la alimentación del Zylog.
10. Se desconectan los paneles del regulador solar.
11. Se desconecta el regulador solar.
12. Se PARA REGISTRO.
13. Se desconecta la alimentación de la placa de sensores, solo queda el consumo residual que pueda tener el Zylog.

En cada ensayo se obtienen dos ficheros EXCEL distintos.

En el primer fichero se recogen datos relacionados con el estado cinemático del vehículo:

- Tiempo [s]
- Velocidad [km/h]
- Altitud GPS [m]
- Altitud barómetro [m]

En el segundo fichero se lleva un registro del comportamiento energético del vehículo mediante los siguientes datos:

- Tensión en la batería [V]
- Intensidad suministrada al motor [A]
- Intensidad de recarga solar [A]
- Radiación solar [W/m^2]

Debido a las condiciones de los dos primeros ensayos, los datos relacionados con la carga solar solo serán tenidos en cuenta en el tercer ensayo.

Capítulo 5

Ensayos experimentales

5.1. Ensayo 1: Pendiente

Como se ha mencionado anteriormente, el primer ensayo consiste en cuantificar la pérdida de energía debida a la circulación por calzadas con pendientes pronunciadas, así como su recuperación cuando se desciende por ellas.

La pendiente seleccionada está situada en el Campus Universitario Río Ebro y posee un desnivel de 8 metros en 240 metros de recorrido. Esto resulta en una pendiente del 3,33% que será considerada como constante.

En este ensayo el Zylog aún no contaba con un barómetro que le proporcionase datos de altitud precisos, por lo que han sido obtenidos de *topographic-map.com*

En la figura 5.1 puede apreciarse el recorrido de este primer ensayo, durante el cual se realizan cinco subidas y cinco bajadas consecutivas.



Figura 5.1: Recorrido del ensayo n.º 1

Se realizan 5 subidas y 5 bajadas consecutivas con un desnivel de 8 metros.

Para el registro de velocidades se utiliza una aplicación destinada a monitorizar el rendimiento deportivo de un corredor llamada *Sportactive*.

Los valores de la velocidad quedan registrados cada 5 segundos y forman la gráfica mostrada en la figura 5.2.

Además, como se ha mencionado, la pendiente se asume constante y queda de la misma manera reflejada en la figura 5.2. Los tramos en los que la pendiente tiene valor nulo pertenecen a la base y la cima de la rampa, donde el vehículo da la vuelta, que se asumen planos.

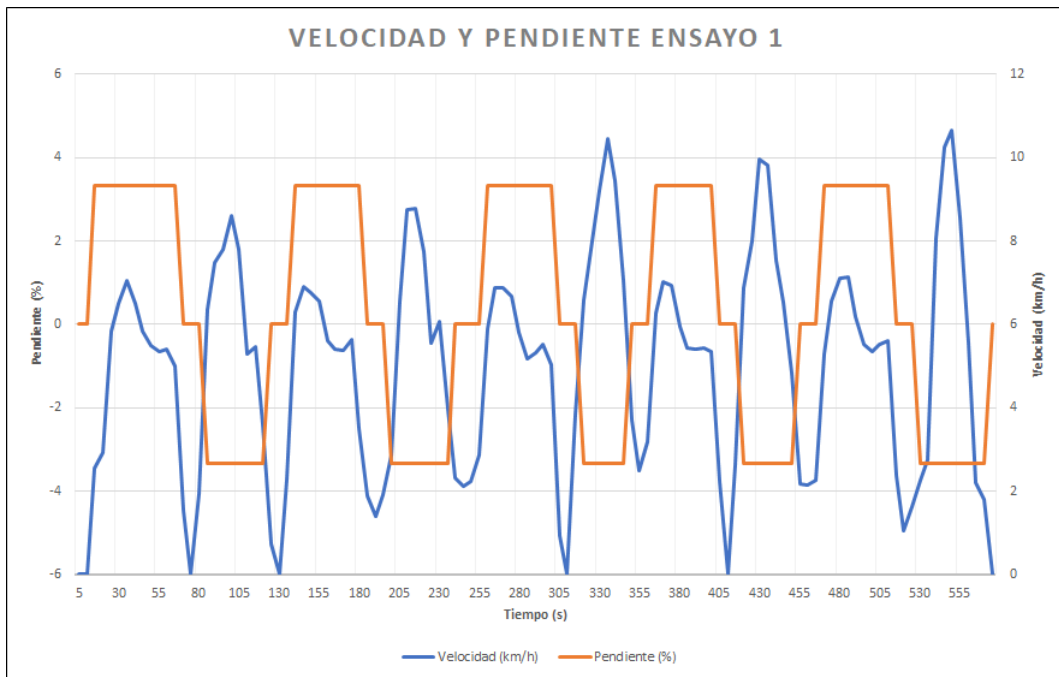


Figura 5.2: Velocidades y pendientes ensayo 1

Se considera una pendiente constante en subida y bajada, mientras que la cima y la base de la rampa se asumen planas.

Además, es posible conocer la potencia eléctrica desarrollada por el vehículo de la siguiente manera:

$$P_{Zylog} = U_{bat} * I_{motor} \quad (5.1)$$

Siendo $P_{Zylog}[W]$ la potencia del Zylog en cada instante de tiempo, $U_{bat}[V]$ la tensión en su batería y $I_{motor}[A]$ la intensidad que recibe su motor.

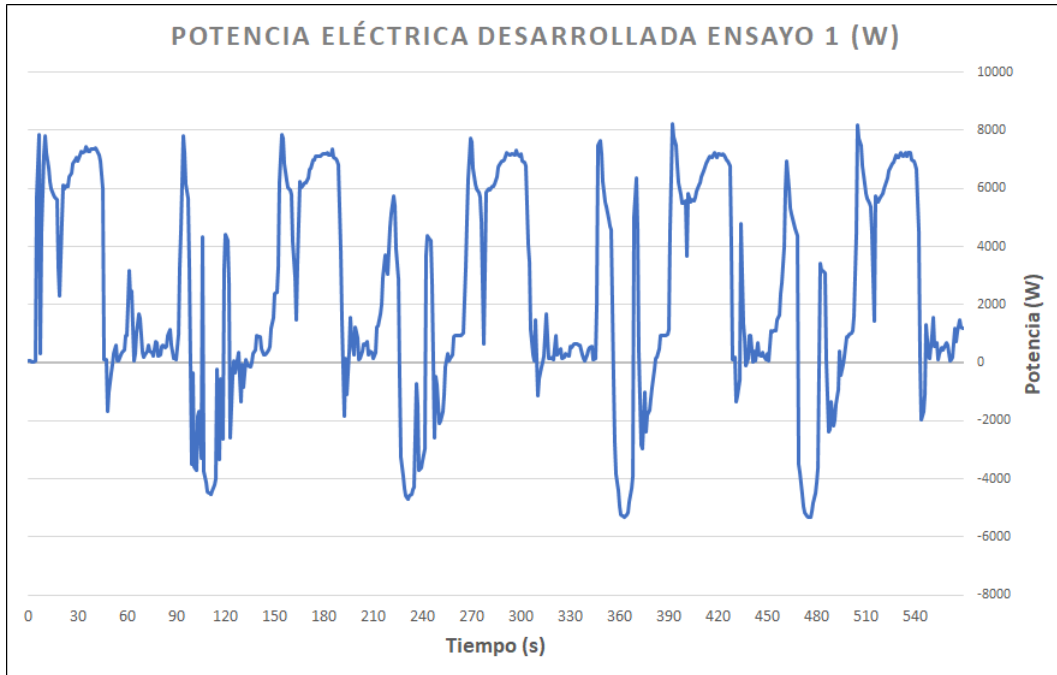


Figura 5.3: Potencia eléctrica desarrollada por el Zylog en el primer ensayo. Nótese los valores negativos debidos al frenado regenerativo al bajar la pendiente del circuito.

En la gráfica mostrada (figura 5.3) se muestran los valores de potencia desarrollada por el motor, siendo positiva cuando el motor aplica fuerza sobre el asfalto y negativa cuando la recibe.

Es importante saber que esta potencia negativa no se puede deducir del cálculo de la Fuerza de tracción, pues incluye solo la disipación de energía por parte del motor y no de los frenos.

Como se ha mencionado en los **Anexos C**, la energía (o potencia) recuperada por frenado regenerativo debe calcularse a partir de la energía cinética del vehículo en un momento dado. A la hora de comparar las gráficas de potencia teóricas (MATLAB) y experimentales (figura 5.3), se ajustará el % de recuperación de energía por frenado regenerativo para que los picos negativos coincidan.

5.2. Ensayo 2: Zig Zag

El ensayo de zigzag se realiza entre las naves mostradas en la figura 5.1 y tiene como objetivo modelizar la actuación del Zylog bajo condiciones de aceleración y frenado frecuentes, a altitud constante.

Para ello, se sigue el recorrido mostrado a continuación en la figura 5.4.

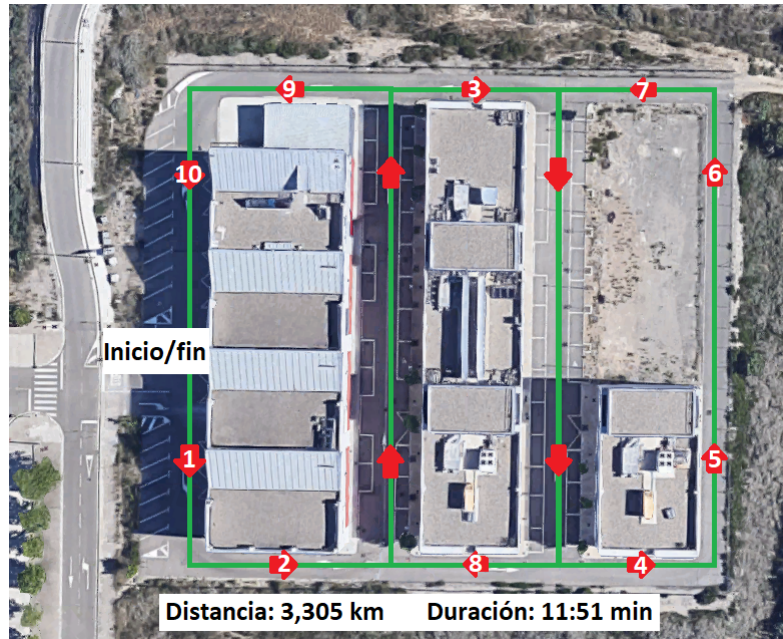


Figura 5.4: Recorrido del ensayo n.º 2

Siguiendo la dirección de las flechas (se han colocado números en las de paso único para facilitar el entendimiento del recorrido) se realizan 6 vueltas al circuito, para el cual se asume una altitud constante.

El recorrido empieza en la entrada del recinto. A continuación, se bordea el primer edificio por su lado derecho, el segundo por el izquierdo y el tercero de nuevo por el derecho. La vuelta se realiza de la misma manera, pero invirtiendo los lados por los que se rodea a los edificios. Finalmente, se llega hasta el inicio, habiendo completado una de las 6 vueltas que conforman el recorrido.

Con una velocidad media de 4,77 km/h, el Zylog toma las curvas a unos 4 km/h y acelera hasta los 7,5 km/h en recta. La gráfica de velocidades resultante es la siguiente:

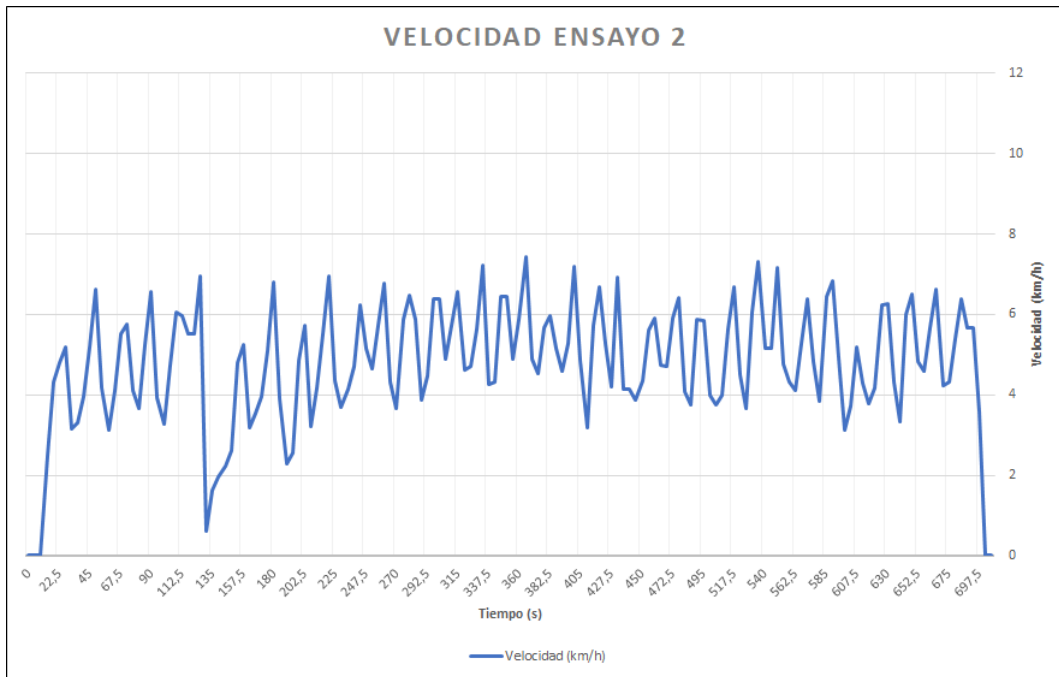


Figura 5.5: Velocidades ensayo 2

Asumiendo terreno llano, se puede apreciar el frecuente cambio de velocidad que sufre el Zylog.

La potencia eléctrica desarrollada por el motor en este ensayo se muestra en la figura 5.6. Al igual que en la velocidad, se aprecia una alta frecuencia de variación de los valores, con máximas de $8kW$ y mínimas de $-3kW$.

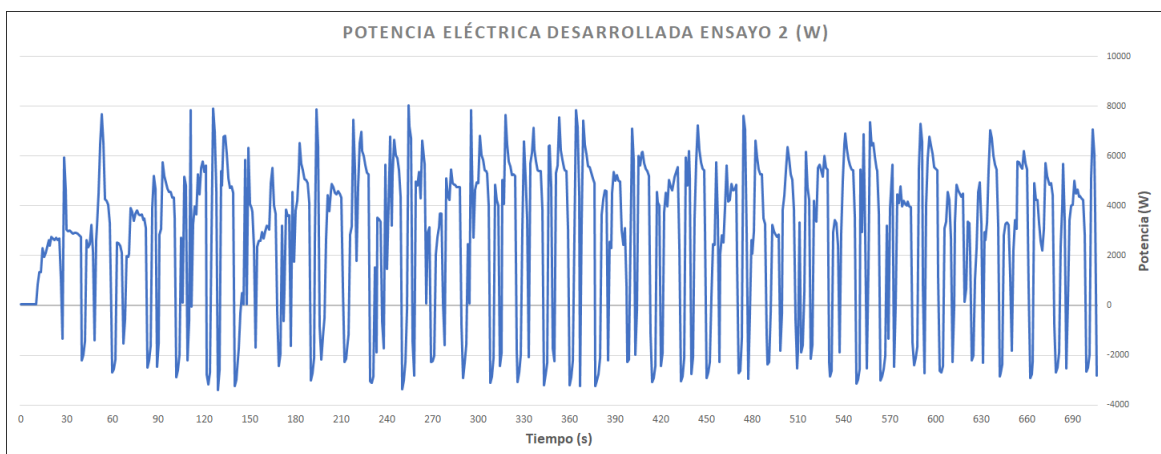


Figura 5.6: Potencia eléctrica ensayo 2

Se observa una rápida variación de los requerimientos de potencia.

5.3. Ensayo 3: Circuito completo

El tercer ensayo consiste en un recorrido por el campus universitario Río Ebro de la Universidad de Zaragoza que pretende asemejarse lo más posible a una situación real. Utilizando un barómetro y un GPS se mide tanto la velocidad como la pendiente que experimenta el Zylog en cada segundo del ensayo.

5.3.1. Descripción del recorrido y gráfica de velocidad



Figura 5.7: Recorrido realizado para el ensayo 3
Se atraviesan zonas rápidas y lentas, rectas y con curvas, para simular lo más fielmente un recorrido real. Se efectúan dos vueltas al mismo.

El circuito a recorrer es el siguiente:

- Se parte de las naves ya vistas en los anteriores ensayos.
- Se recorre el parking del edificio Ada Byron en dirección sur.
- Se gira a la izquierda camino al antiguo edificio del CIRCE.
- Se abandona la carretera a la altura de la rotonda y se continúa hacia los laboratorios del edificio Agustín de Betancourt.
- Se rodea dichos laboratorios y se toma rumbo hacia el parking del edificio.
- Se entra en el parking por su cara norte y se sale por la salida que da al edificio de FICO.
- Se rodea el parking del edificio y se vuelve a entrar al parking anterior.
- Se sale nuevamente del parking y se recorre la vía principal del campus, que pasa por delante de los 3 edificios principales.
- Se rodea el edificio Ada Byron y el vehículo se dirige hacia la salida para completar la vuelta.
- Se repite el proceso, después de realizar una parada.

En la figura 5.8 queda reflejada la variación de la velocidad a lo largo de las dos vueltas que componen el recorrido, medida por el GPS que incorpora el Zylog.

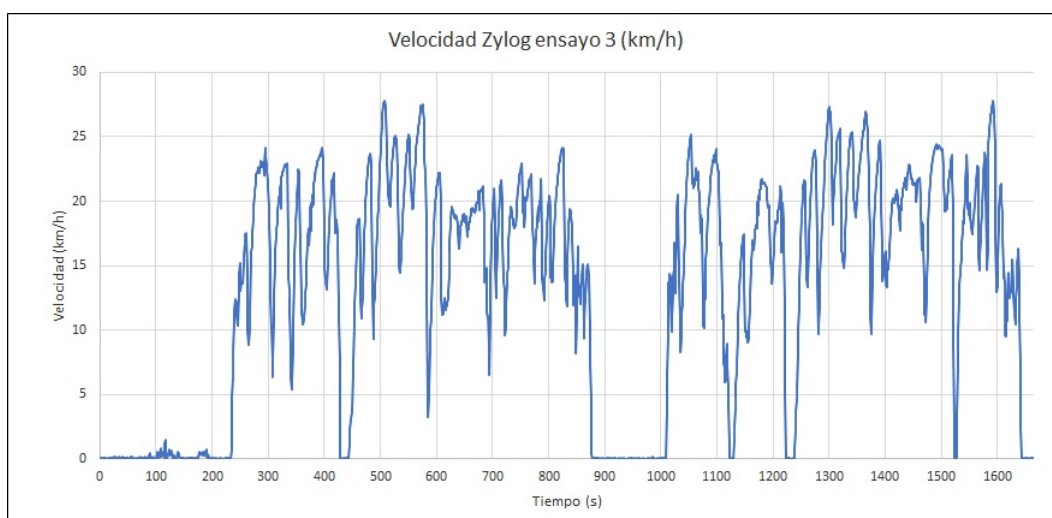


Figura 5.8: Velocidad registrada por el GPS para el ensayo 3. Se distinguen claramente las dos vueltas que realiza en vehículo, así como sus paradas previas.

5.3.2. Cálculo y corrección de las pendientes

Tanto el barómetro como el GPS son capaces de medir la altitud a la que se encuentra el vehículo cada segundo, como se muestra en la figura 5.9.

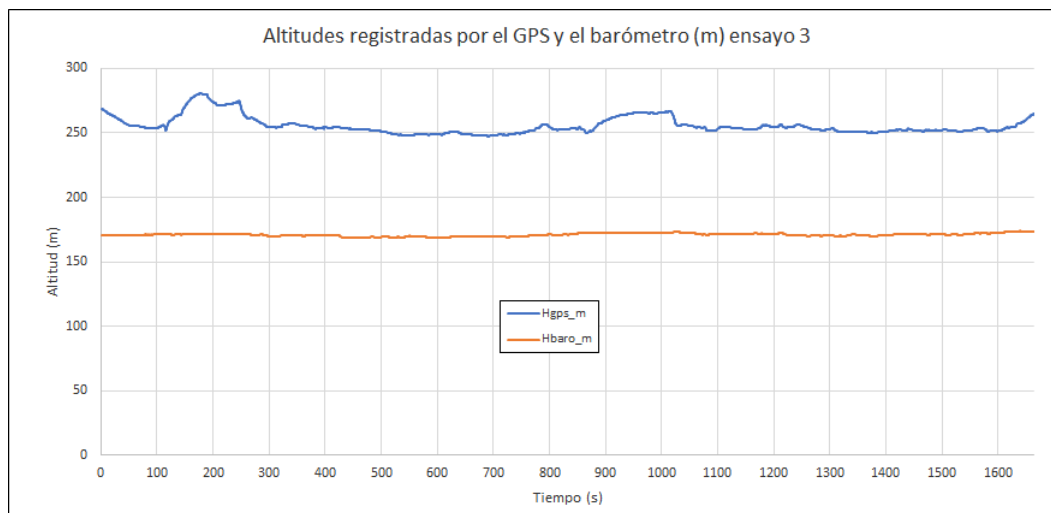


Figura 5.9: Altitudes registradas por el barómetro y el GPS en metros. Se observa una variación muy elevada en las medidas del GPS y un error de exactitud en las medidas del barómetro (Zaragoza está a unos 200 metros de altitud).

Para poder interpretar el gráfico mostrado, es necesario conocer cómo miden altitudes ambos dispositivos:

- La altitud medida por un GPS se calcula mediante triangulación de la posición del dispositivo. Este proceso requiere el uso de 3 satélites para la obtención de la posición y de un cuarto para la altitud. Sin embargo, los satélites no se sitúan todos con el mismo ángulo respecto al GPS. Para estimar la altura de forma óptima debería tenerse un satélite justo encima y, a continuación, tener al menos otros tres satélites situados a la altura del horizonte y con la misma separación entre ellos (120°). Esto situaría el dispositivo en el centro de los satélites en el plano vertical (figura 5.10). Por ello, este método es útil para conocer una estimación aproximada de la altitud, pero resulta pésimo para el cálculo de la pendiente en un momento dado gracias a su amplio error.
- Por otro lado, un barómetro mide altitud utilizando la presión atmosférica, que disminuye con la altura. El error que, a menudo, sufren esta clase de equipos es aquel de exactitud. Si bien son muy precisos, es frecuente que calculen mal el valor de partida. Por ello, es necesario calibrarlos o utilizarlos en conjunción con un GPS que les pueda transmitir este dato de partida. Cabe mencionar que ninguna de las dos opciones fue llevada a cabo durante el transcurso de este ensayo.

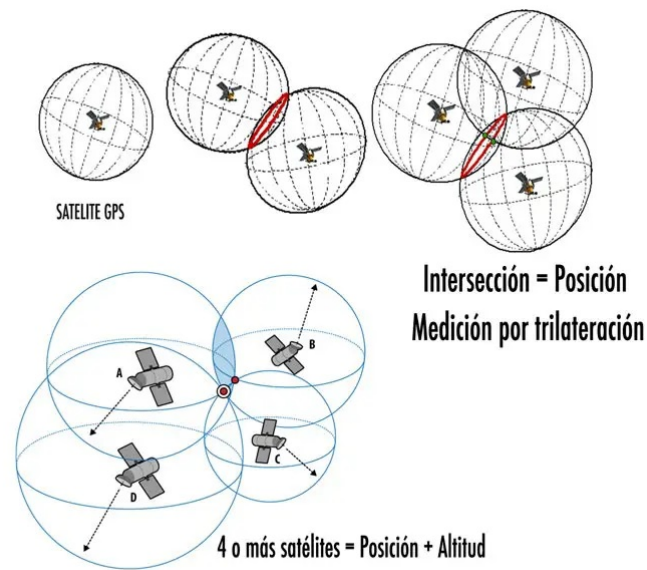


Figura 5.10: Medida de posición y altitud por GPS.
 Son necesarios 4 satélites para conocer la altitud a la que se encuentra el dispositivo.
 Fuente: <https://www.premarathon.com/>

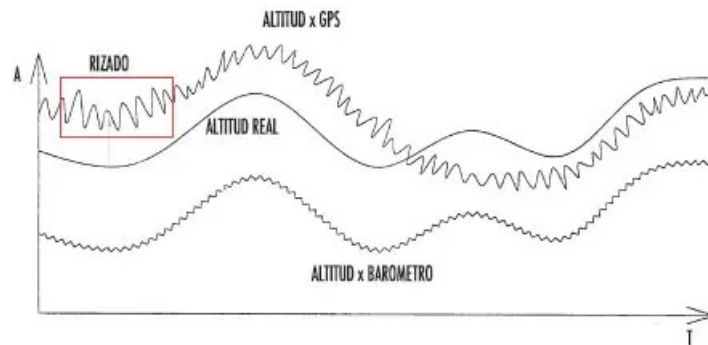


Figura 5.11: Comparación de valores proporcionados por GPS y barómetro.
 Nótese la imprecisión (rizado) que sufre el GPS. Fuente:
<https://www.premarathon.com/>

El cálculo de las pendientes se realiza a partir de las tablas de altitudes que tienen un periodo de $T = 1[s]$, utilizando la siguiente expresión:

$$P_i = \frac{\Delta h_i}{d_i} = \frac{h_{i+1} - h_i}{v_i} \quad (5.2)$$

Siendo:

- $P_i[\%]$, la pendiente de la calzada en un instante de tiempo i .
- $h_i[m]$, la altitud a la que se encuentra el Zylog en i .
- $d_i[m]$, la distancia recorrida entre i e $i + 1$ (1 segundo).
- $v_i[m/s]$, la velocidad en i .

Es posible intercambiar los valores de distancia recorrida en un periodo por los de velocidad, ya que al ser $T = 1[s]$ y v estar expresada en m/s la distancia recorrida es igual al valor de la velocidad para cualquier instante de tiempo. Se puede apreciar el resultado de estos cálculos en la figura 5.12.

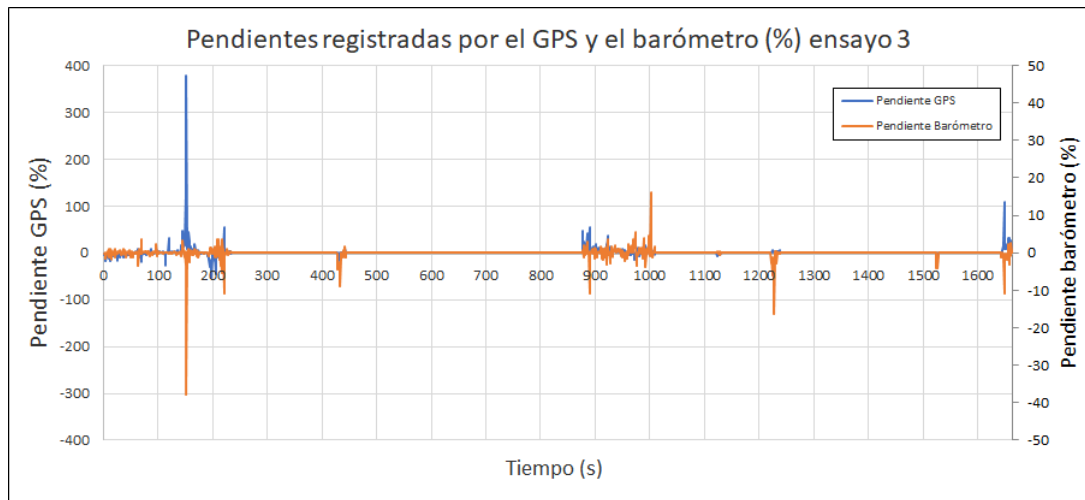


Figura 5.12: Pendientes simples calculadas ensayo 3

Aunque en distintas escalas, ambos sensores dan medidas muy elevadas en los momentos en los que el Zylog está parado.

En la gráfica mostrada, se puede apreciar un pico de casi 400% para la pendiente calculada a partir de los datos del GPS y uno de casi -40% para la del barómetro. Estas desviaciones extremas coinciden con los momentos en los que el Zylog está parado y es que, para valores muy pequeños de $v_i = d_i$ el error se multiplica, pues el cálculo de la pendiente pasa a ser una división entre un término que tiende a 0.

Para filtrar estos valores erróneos y ficticios se opta por asumir una pendiente del 0 % siempre y cuando el vehículo circule a menos de 2 km/h (presumiblemente parado, por errores en el GPS la velocidad nunca es exactamente 0).

Esto se realiza en la misma hoja de cálculo en la que se almacenan los datos y mediante el siguiente comando EXCEL:

Hgps_m	Pendiente GPS	Pendiente GPS corregida	Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)	Hbaro_m	Pendiente Barómetro	Pendiente Barómetro corregida
268,7	-1,68736501	$(E3-E2)/I2;0$	0,118528	0,0329245	170,98	-0,337473	0
268,5	-3,30585798	0	0,090748	0,0252078	170,94	-0,3305858	0

Figura 5.13: Eliminación de falsos resultados en hoja de cálculo.

Si el vehículo está circulando a menos de 2km/h, la pendiente se asume del 0 %.

Una vez aplicado este filtro, los resultados de las pendientes se recalculan y muestran en la figura 5.14.

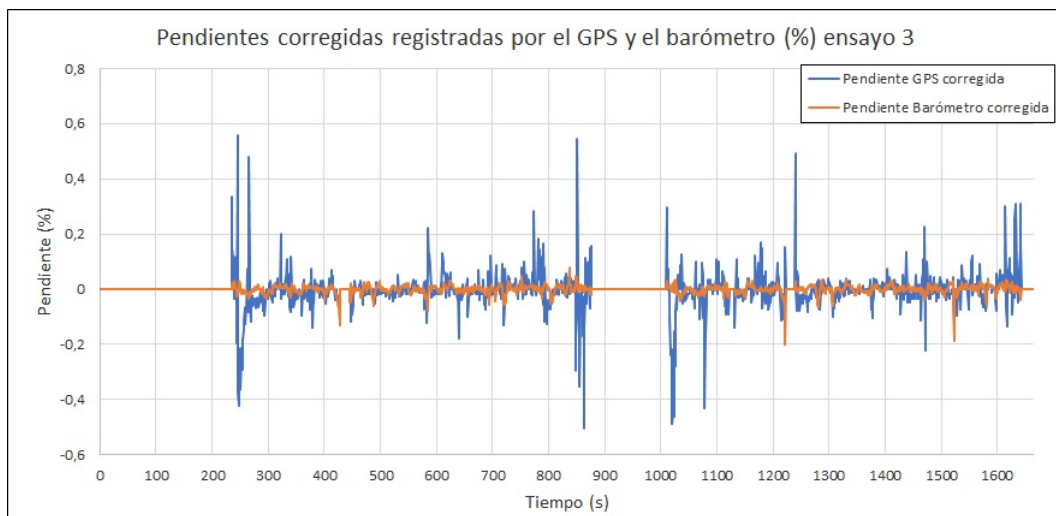


Figura 5.14: Pendientes corregidas ensayo 3

Eliminando los resultados ficticios, los valores máximos disminuyen muy considerablemente.

Los nuevos valores no superan el 0,6 % de pendiente. Se consideran como válidos y se seleccionan los proporcionados por el barómetro por los motivos mencionados anteriormente.

5.3.3. Carga solar

En este tercer ensayo sí que se tienen en cuenta datos relacionados con la energía suministrada por los paneles solares.

En primer lugar, se lleva un registro de la radiación solar [W/m^2] para cada segundo de la prueba, desde que se enciende el cargador solar hasta que se apaga. Puede apreciarse en la siguiente figura (5.15). Una vez el Zylog sale de la nave, los paneles perciben una radiación de entre 500 y 700 W/m^2 , que decae hasta aprox. los 50 W/m^2 en los momentos que el vehículo atraviesa zonas de sombra.

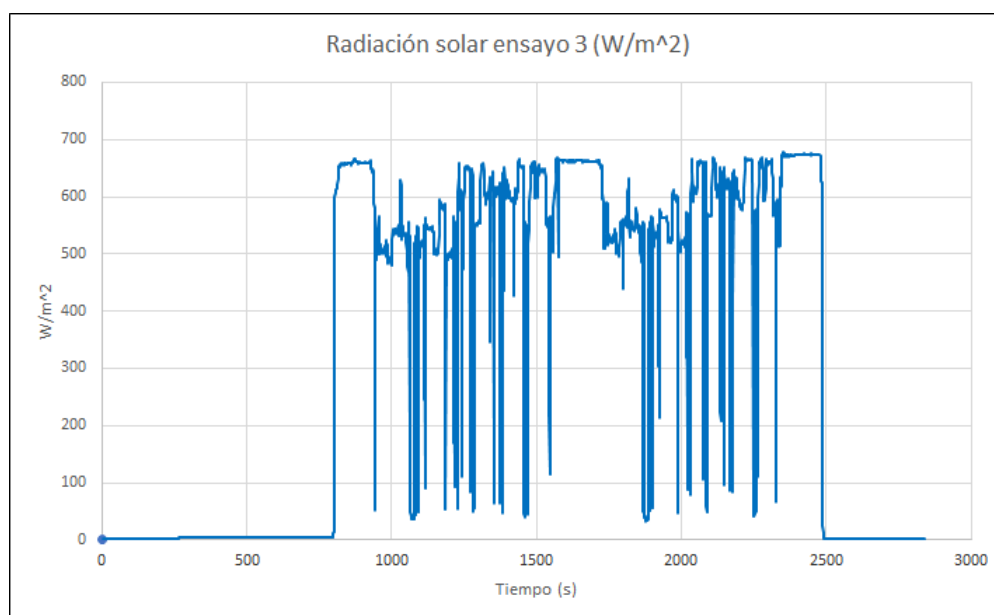


Figura 5.15: Radiación solar ensayo 3

En momentos de sombra, el valor baja rápidamente de 500-700 W/m^2 a 50 W/m^2

El tiempo total de este registro es mayor a los anteriores de velocidad y altitud porque se empieza a medir al iniciar el registro, mientras que los datos ya mencionados se miden justo en el momento de realizar los recorridos. De ahora en adelante, se ajustarán ambos registros para que tengan la misma duración, recortando los momentos en los que se medían datos del Zylog, pero este estaba parado.

Además, con los valores de la intensidad de los paneles solares y la tensión de la batería, es posible conocer la potencia de carga solar, que es una de las tres variables de entrada en el modelo de SIMULINK, junto con la velocidad y la pendiente.

$$P_{Solar} = U_{bat} * I_{recarga} \quad (5.3)$$

Siendo $P_{Solar}[W]$ la potencia de recarga de los paneles solares en cada instante de tiempo, $U_{bat}[V]$ la tensión en su batería y $I_{recarga}[A]$ la intensidad que recibe de parte de la instalación fotovoltaica. Puede verse la variación de potencia suministrada por el conjunto solar en la figura 5.16.

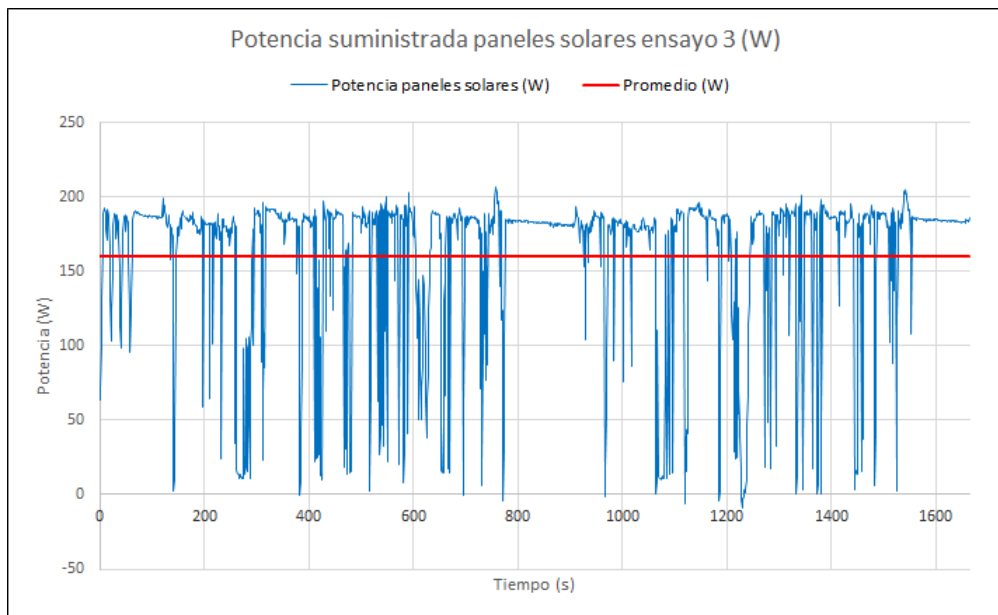


Figura 5.16: Potencia suministrada por los paneles solares ensayo 3
Salvo en momentos de sombra, el valor de la potencia ronda los 180 W y el promedio es de 160,5 W.

En la figura anterior, la duración total del ensayo se ha corregido y se han alineado el inicio y el final del recorrido para velocidad, pendiente y potencia solar. Los datos quedan listos para introducirse en el diagrama de bloques.

5.3.4. Medida experimental de parámetros energéticos

En cuanto a los parámetros energéticos, al igual que en los ensayos anteriores, se tiene registro de la potencia desarrollada por el Zylog a lo largo del recorrido.

Además, debido a la larga duración de la prueba (23 min), es notable la caída de tensión en las baterías, por lo que también se indica a continuación.

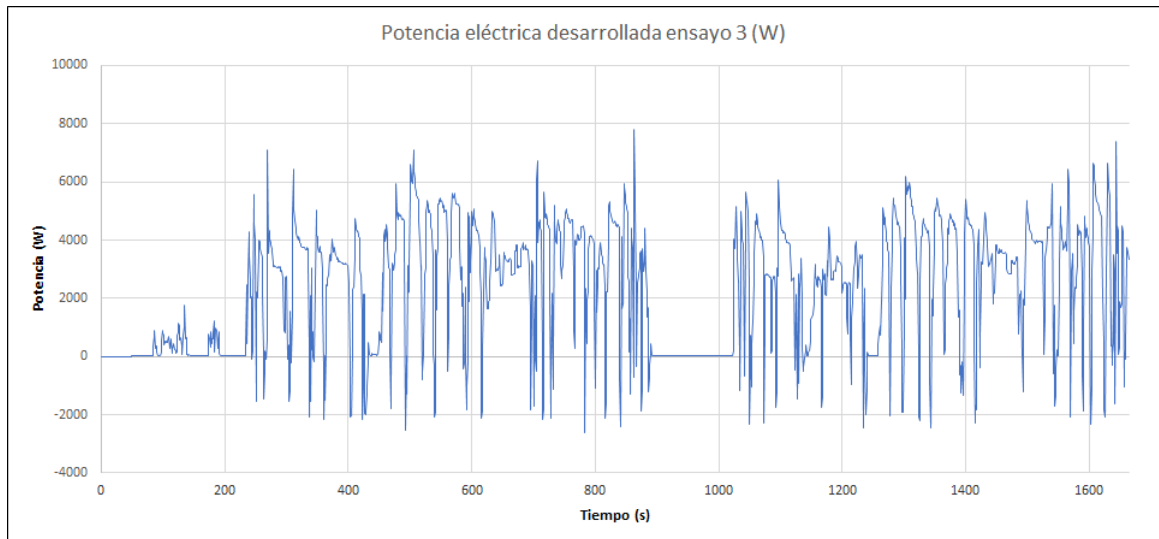


Figura 5.17: Potencia eléctrica desarrollada por el Zylog ensayo 3
Se alinean las gráficas de potencia y velocidad para poder realizar comparaciones.

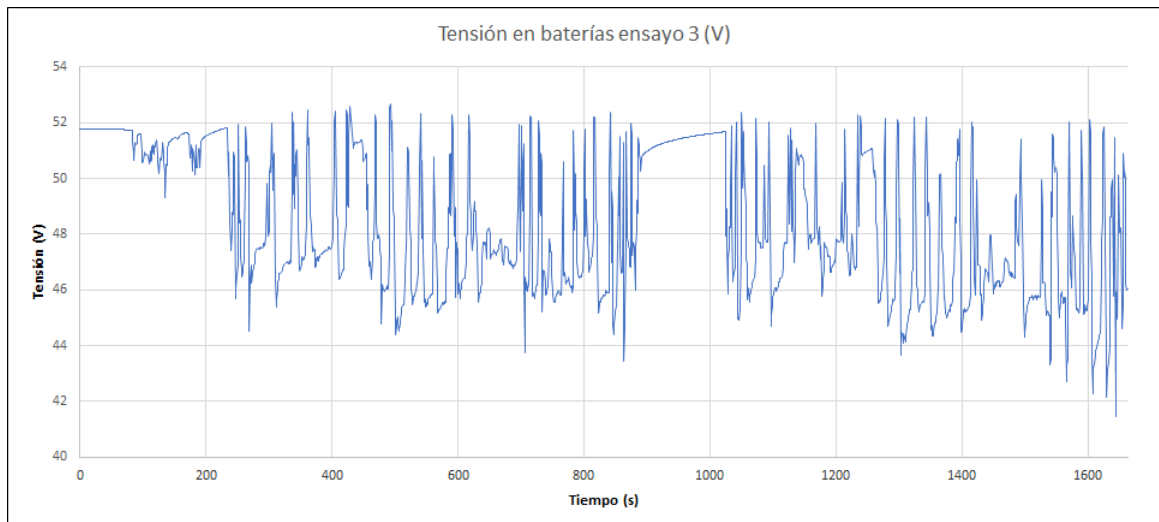


Figura 5.18: Tensión en las baterías a lo largo del ensayo 3
Hay una clara diferencia entre la tensión en vacío y la tensión de trabajo de las baterías.

Resulta complicado interpretar los datos de la figura 5.18 debido a que en ella se expresan dos variables diferentes: Tensión en vacío (cuando la Fuerza de tracción es cero) y Tensión de trabajo (cuando no lo es).

La Tensión en vacío se mantiene constante en torno a los 52 voltios, sin embargo, resulta interesante separar la Tensión de trabajo. Para ello se establece la condición de $P_{Zylog} > 100W$ para cuantificar la tensión en cada instante de tiempo, resultado en la figura 5.19.

En esta figura se puede apreciar una rápida caída en la Tensión de trabajo, nada más empieza en ensayo, una recuperación en la parada intermedia y una caída aún mayor en la segunda vuelta al recorrido.

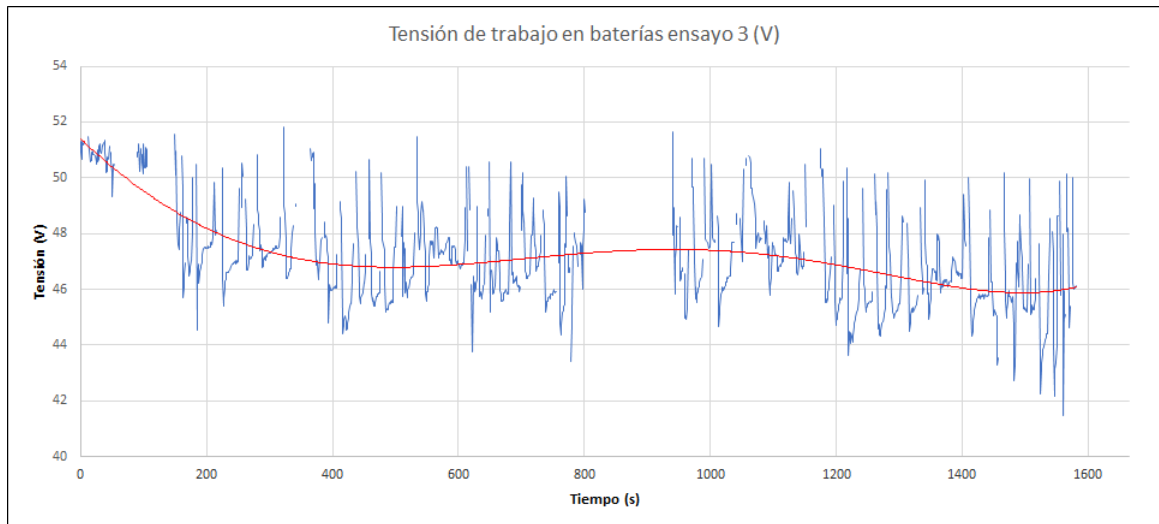


Figura 5.19: Tensión de trabajo en las baterías a lo largo del ensayo 3
Se eliminan los valores de tensión para cuyos instantes de tiempo la potencia desarrollada por el vehículo es menor de 100 vatios.

Capítulo 6

Modelo teórico en MatLab

En este capítulo, se introducirán los datos de velocidad, pendiente, y potencia de recarga solar registrados para cada uno de los ensayos descritos.

A continuación, se obtendrá una curva de potencia que se comparará con las obtenidas experimentalmente, a partir de la expresión:

$$P_{Zylog} = U_{bat} * I_{motor} \quad (6.1)$$

Esta curva validará el modelo teórico en cuanto a análisis cinemático se refiere. Se procederá a valorar los resultados obtenidos a partir de ella con la ayuda, en el ensayo 3, de la figura 5.19.

6.1. Introducción de datos

MATLAB trabaja con puntos en lugar de comas, por lo que es necesario trasladar los datos que quieran introducirse en el modelo de Simulink a un editor de texto donde cambiar todas las comas por puntos.

Una vez hecho esto, se introducen los valores de tiempo y de la variable pertinente en el bloque *Repeating Table*, tal y como se muestra en la figura 6.1.

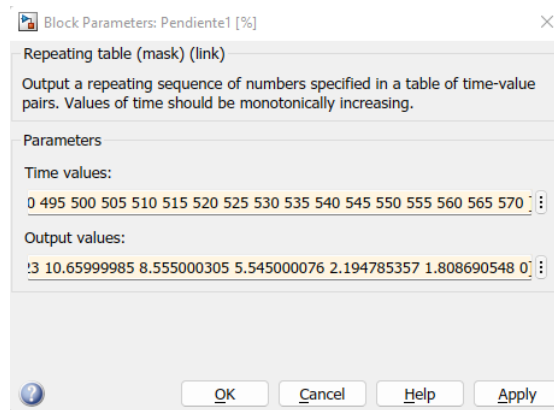


Figura 6.1: Introducción de datos en el bloque *Repeating Table*
 Se introducen los valores de tiempo en el recuadro superior y los valores de la variable deseada en el inferior.

A continuación, es necesario introducir la duración del ensayo en segundos, que debe coincidir con el máximo valor de tiempo de los datos declarados.

6.2. Simulaciones numéricas

Se realizará una simulación para cada ensayo. Esta simulación arrojará una curva de potencia eléctrica obtenida a partir de los datos de velocidad, pendiente y potencia de carga solar.

Además, se obtendrá los siguientes datos relacionados con el comportamiento energético del Zylog:

1. Energía consumida [kWh]
2. Consumo [kWh/100km]
3. Kilómetros disponibles [km]
4. Distancia recorrida [km]
5. Energía disponible [kWh]
6. State of charge [%]
7. Gráfica de potencias (vehículo y sistemas de ahorro)
8. Gráfica de consumos (con y sin sistemas de ahorro)
9. % de ahorro de cada sistema.

6.2.1. Ensayo 1: Pendiente

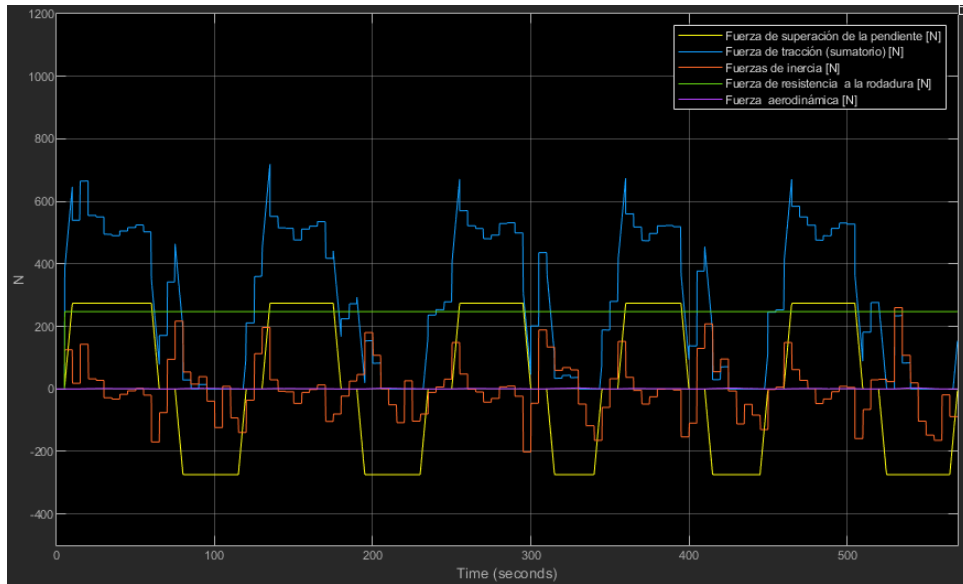


Figura 6.2: Fuerzas involucradas en el ensayo 1

La fuerza mayoritaria es la de resistencia a la rodadura, siendo superada ligeramente por la de superación de la pendiente en momentos de pendiente positiva. Por otro lado, la fuerza aerodinámica es despreciable.

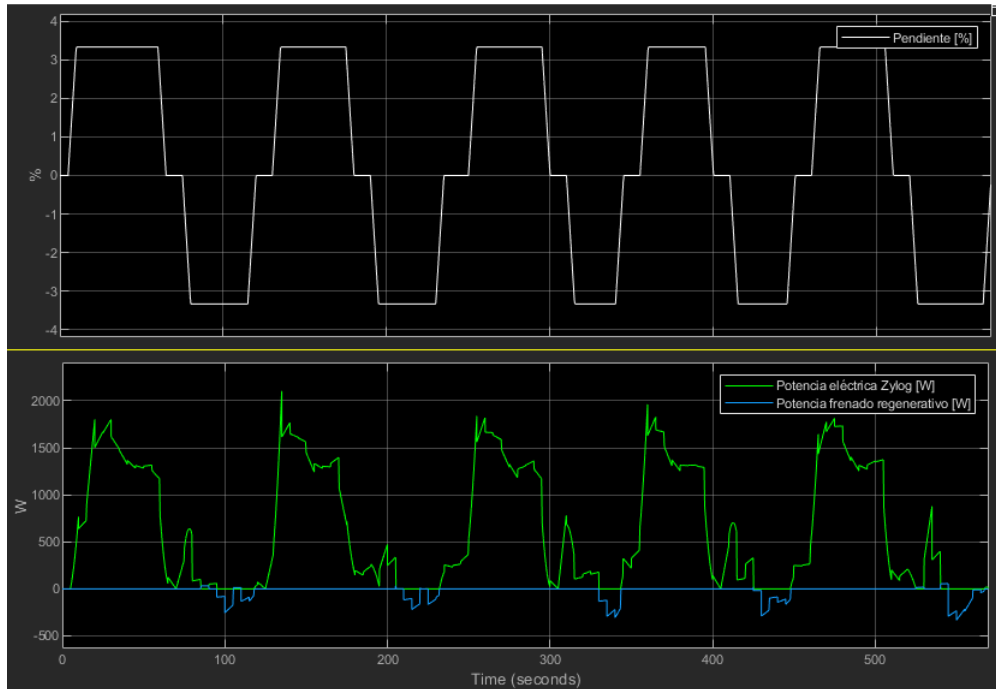
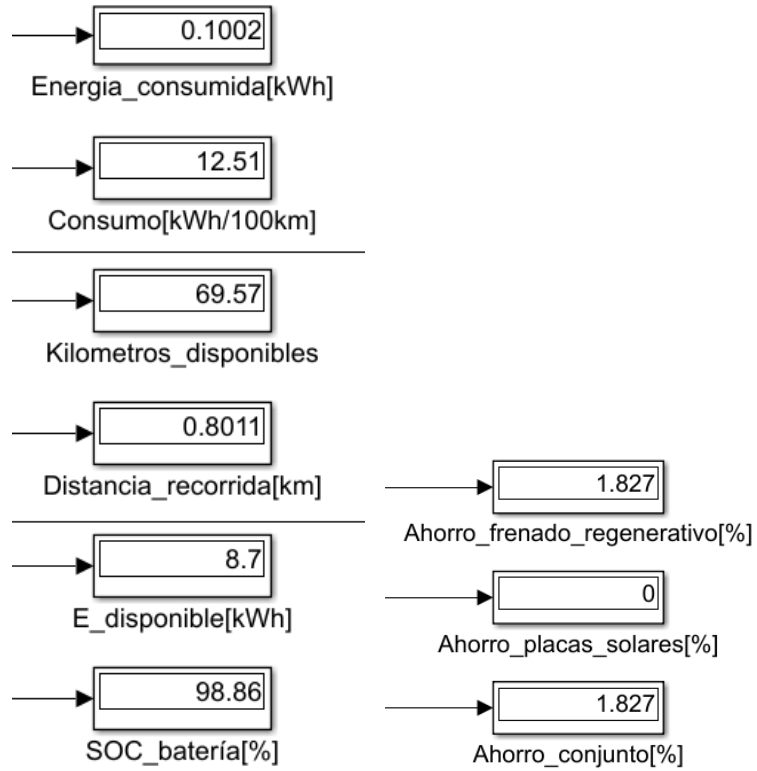


Figura 6.3: Potencia eléctrica ensayo 1 con pendiente y potencia negativa debido al frenado regenerativo.

Los picos de potencia coinciden con los instantes de pendiente positiva.



(a) Resultados-E

(b) Ahorros

Figura 6.4: Resultados ensayo 1

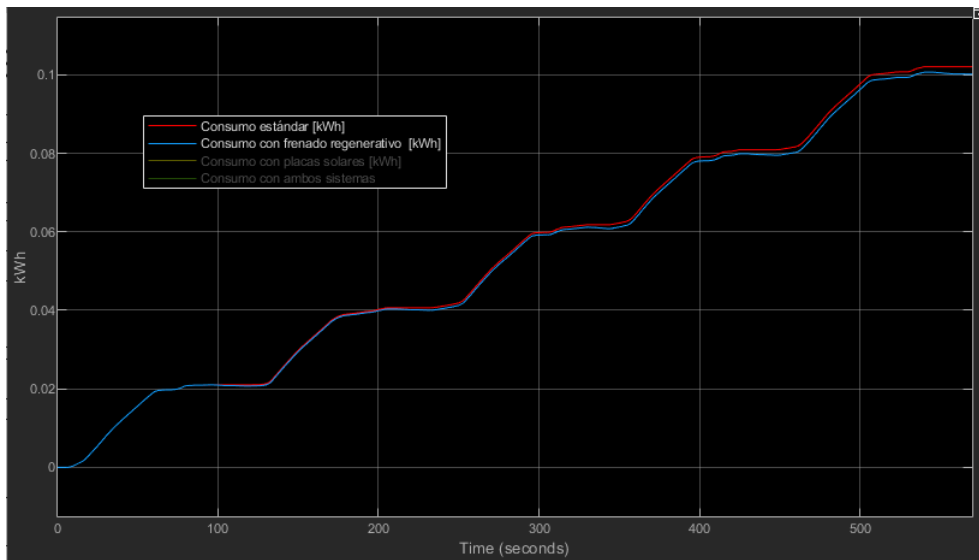


Figura 6.5: Consumo estándar y con frenado regenerativo
El ahorro, de cerca del 2% no es apenas apreciable.

6.2.2. Ensayo 2: Zig Zag

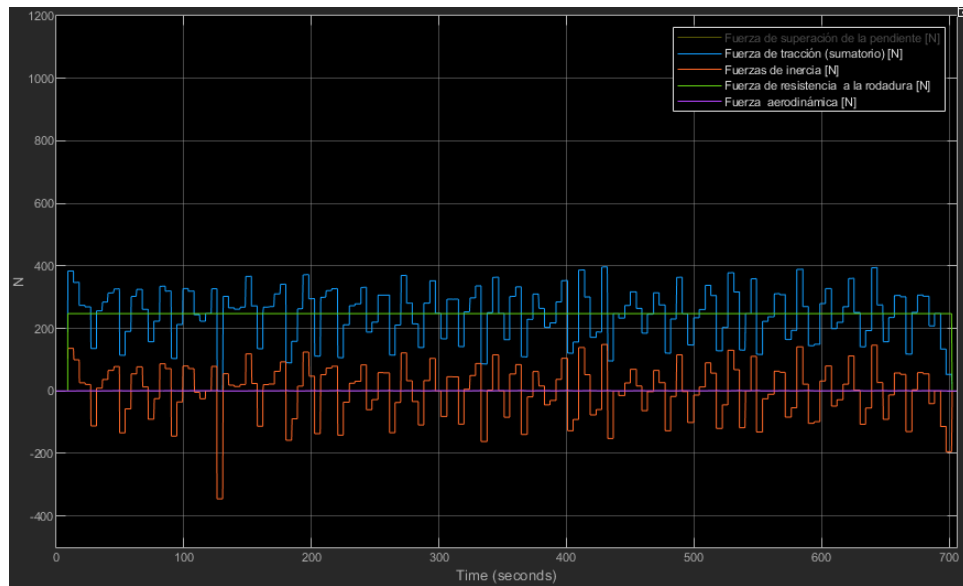


Figura 6.6: Fuerzas involucradas en el ensayo 2

La fuerza mayoritaria es la inercial, como cabría esperar en un ensayo caracterizado por sus aceleraciones y frenadas.

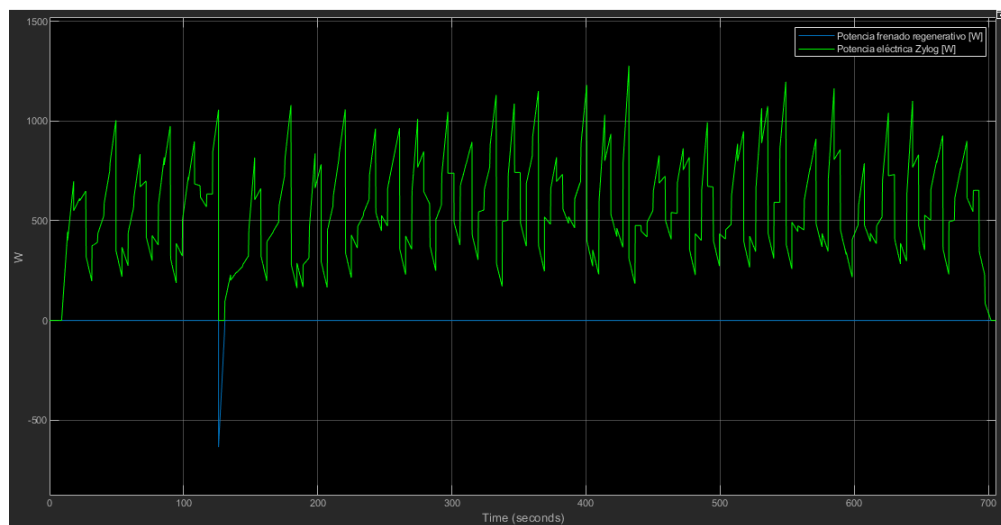


Figura 6.7: Potencia eléctrica ensayo 2 con potencia frenado regenerativo. No se desarrolla nada de potencia por frenado regenerativo según esta simulación.

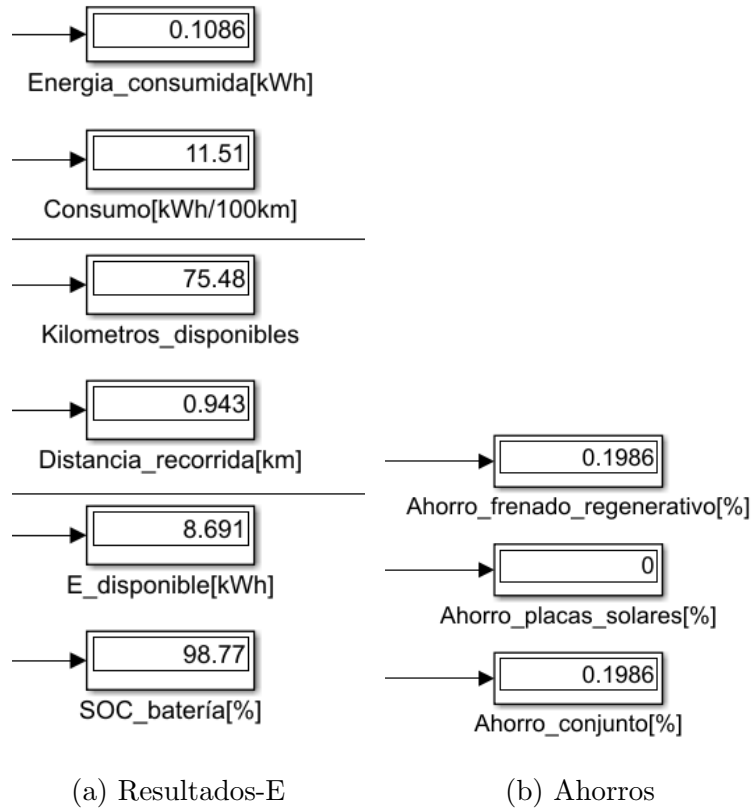


Figura 6.8: Resultados ensayo 2

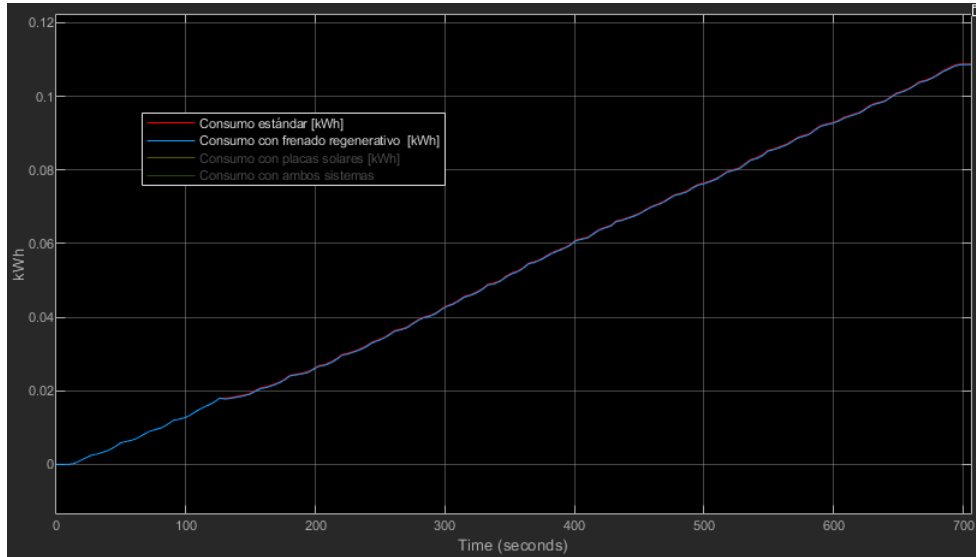


Figura 6.9: Consumo estándar y con frenado regenerativo
El ahorro, de cerca del 0,2 % no es apenas apreciable.

6.2.3. Ensayo 3: Circuito completo

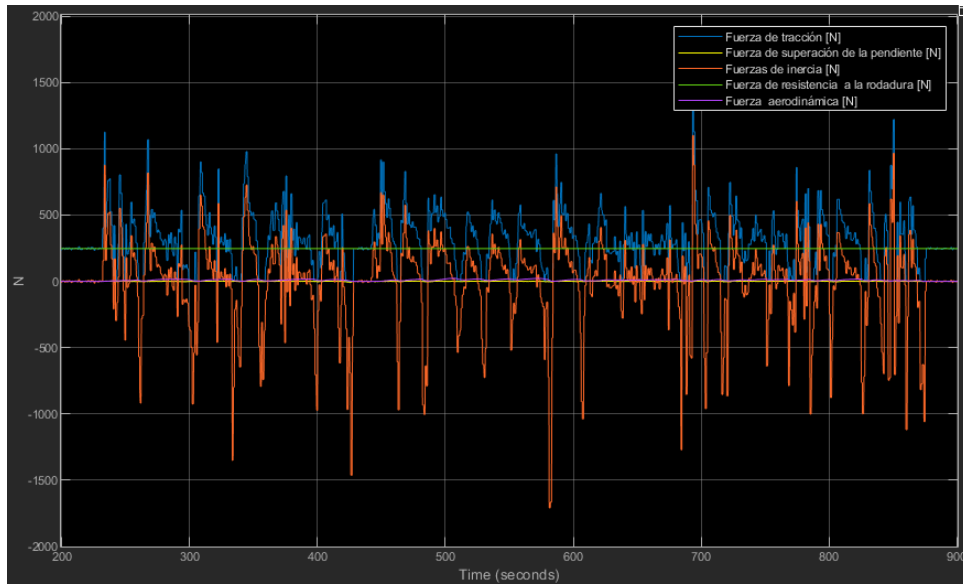


Figura 6.10: Fuerzas involucradas en el ensayo 3 (1 vuelta)

La fuerza mayoritaria es nuevamente la inercial. A pesar de contabilizarse, la fuerza de superación de la pendiente y la fuerza aerodinámica resultan despreciables.

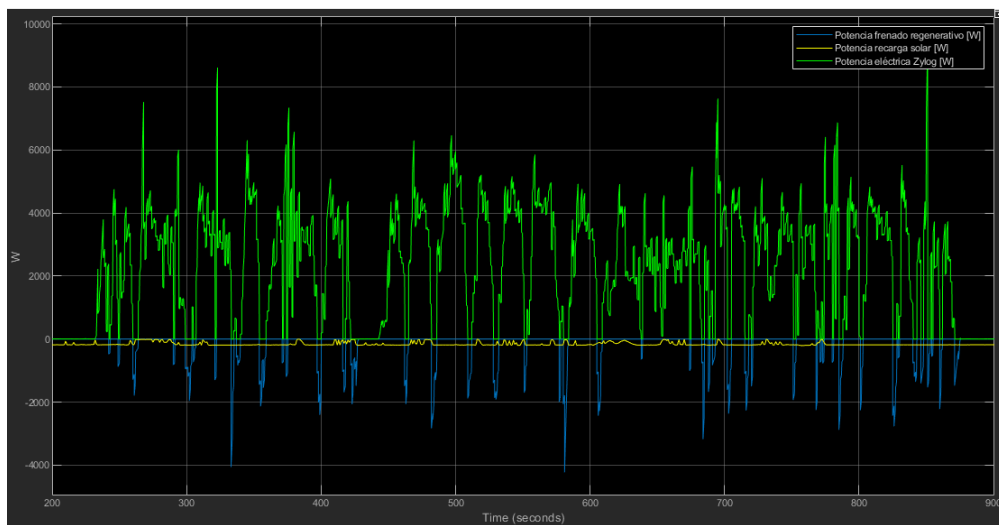
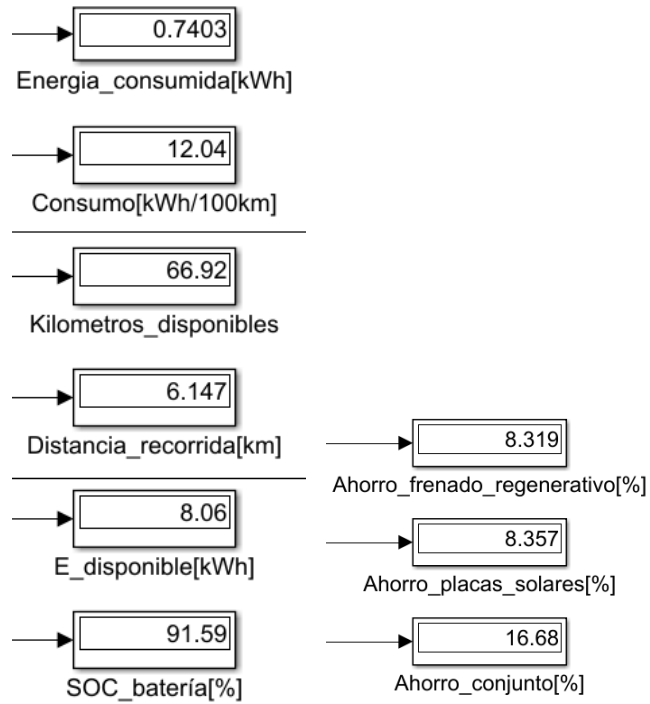


Figura 6.11: Potencia eléctrica ensayo 3 con potencia frenado regenerativo y potencia de carga solar (1 vuelta).

Puede ponerse en perspectiva la magnitud de ambos sistemas de ahorro en relación con el consumo del vehículo.



(a) Resultados-E

(b) Ahorros

Figura 6.12: Resultados ensayo 3

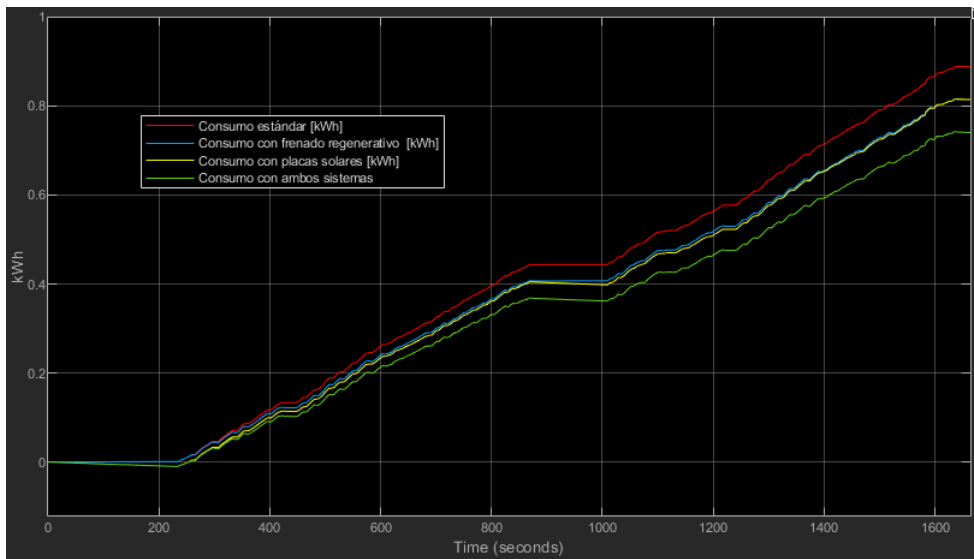


Figura 6.13: Consumo estándar y con frenado regenerativo y con recarga solar
El ahorro, en este caso, es apreciable y se cuantifica en casi el 17%.

Capítulo 7

Validación y comparación

7.1. Validación del modelo mediante comparación de potencias

Como ya se ha mencionado anteriormente, la validación del modelo teórico pasa por comparar las gráficas de potencia eléctrica resultantes de él con las obtenidas experimentalmente.

Viendo las figuras 5.3, 6.3 y 5.6 y 6.7 se puede apreciar una gran diferencia entre valores teóricos y experimentales de potencia.

En el caso del ensayo 1 se pasa de picos de 8kW en potencia medida experimentalmente a picos de tan solo 1,8kW en el caso de su contraparte simulada. Y en el ensayo 2, la potencia máxima de también 8kW pasa a ser de 1kW.

Esto puede ser debido a un amplio tiempo de muestreo (5 segundos) que no permite captar correctamente las variaciones de velocidad.

Sin embargo, en el ensayo 3, pasa algo completamente distinto. Las curvas de potencia teórica y experimental se solapan completamente, como se puede ver en la figura 7.1.

Además, la potencia del frenado regenerativo (en amarillo) coincide con los valores negativos de la potencia experimental.

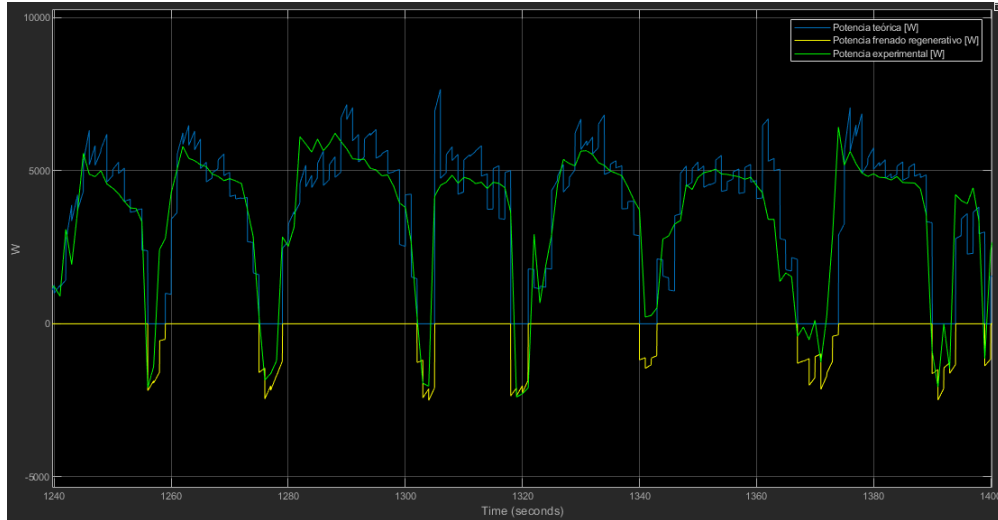


Figura 7.1: Potencia teórica y experimental ensayo 3. Solapamiento de ambas curvas (la gráfica muestra el periodo del segundo 1240 al 1400).

La gráfica mostrada permite validar el modelo cinemático del vehículo, pues el área debajo de la curva (energía consumida) es similar para ambas variables.

Se puede observar el efecto del muestreo en la curva de potencia teórica, que genera variaciones (rizado).

Finalmente, se procede a descartar los dos primeros ensayos por motivo de imprecisión en la medición de la velocidad y los consecuentes errores en sus resultados.

7.2. Comparación de resultados

Resulta ahora interesante cuantificar el consumo a partir de la potencia experimental para compararlo con los consumos ya calculados para el ensayo 3. Esto se muestra en la figura 7.2.

Recuérdese que el consumo calculado a partir de la potencia experimental deberá ser similar al que contempla ambos sistemas de ahorro, es decir, $0,74kWh$.

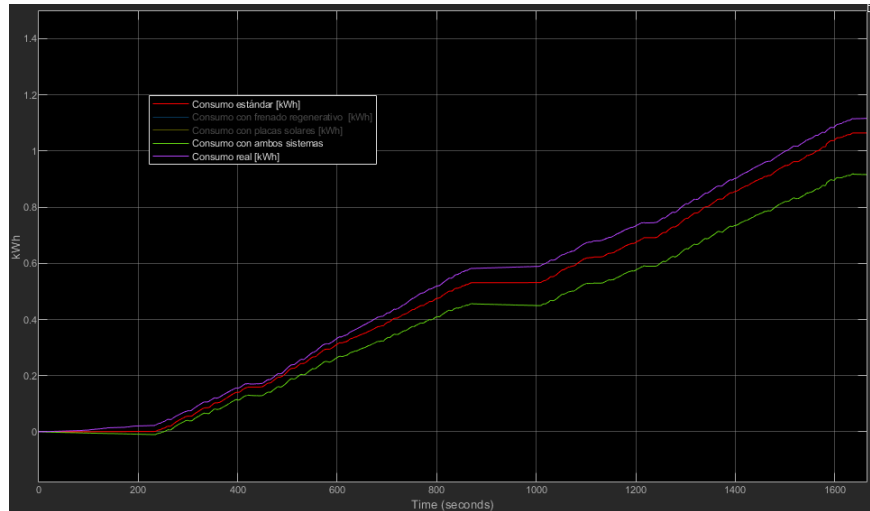


Figura 7.2: Comparación de consumos a partir de potencia experimental y teórica. Se aprecia una diferencia, posiblemente debida al consumo pasivo del vehículo, no cuantificado en el modelo teórico.

Consumo ensayo 3	[kwh]
Con ambos sistemas	0,9159
Estándar (sin sistemas de ahorro)	1,064
A partir de potencia eléctrica real	1,116

Tabla 7.1: Diferentes consumos ensayo 3

Esta variación podría ser debida al consumo pasivo que experimental el vehículo por el simple hecho de estar encendido, variable que no ha sido tenida en cuenta en este estudio.

Capítulo 8

Resultados y conclusiones. Futura continuación

8.1. Resultados y conclusiones

Asumiendo la veracidad del ensayo 3, sobre la base de su concordancia con los datos experimentales, puede hablarse de una serie de resultados que este trabajo da por verídicos.

En primer lugar, el consumo del vehículo es de $12,04kWh/100km$, valor relativamente bajo dentro del mundo de la automoción eléctrica, teniendo en cuenta el escaso peso del vehículo de ensayo.

Además, declara, según este ensayo, una autonomía de $73km$, sin tener en cuenta la curva de descarga de las baterías.

El porcentaje de ahorro del frenado regenerativo se ha cuantificado en un $8,32\%$, mientras que el proporcionado por los paneles solares (en un día soleado) es del $8,36\%$. Valores muy similares que, juntos, proporcional al Zylog un nada despreciable ahorro energético del $16,68\%$

8.2. Futura continuación

Dentro de la posible continuación de este trabajo está la eliminación de los actuales defectos del modelo de SIMULINK: introducción de consumo pasivo, curva de descarga de la batería para el cálculo de la autonomía, condiciones de temperatura y humedad y cuantificación del rendimiento real del motor en función de las revoluciones.

Bibliografía

- [1] Varios. Energía solar fotovoltaica. *Wikipedia*, 2022.
- [2] Varios. Vanguard 1. *Wikipedia*, 2022.
- [3] Max Roser. Why did renewables become so cheap so fast? *Our Word in Data*, 2020.
- [4] Varios. Solar impulse. *Wikipedia*, 2022.
- [5] Francisco Javier Granado Alfonso. Análisis del comportamiento y consumo de vehículo eléctrico tipo carro de golf con sistema de captación de energía solar integrado. Trabajo fin de grado, Universidad de Zaragoza, 2018.
- [6] Sergio Horcas Esteban. Análisis de prestaciones y consumo de energía de un vehículo eléctrico industrial para aplicaciones de logística de distribución urbana. Trabajo fin de grado, Universidad de Zaragoza, 2019.
- [7] José Francisco Sanz. Prácticas de la asignatura "movilidad eléctrica". *Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza*, 2020/2021.
- [8] Varios. Célula fotoeléctrica. *Wikipedia*, 2022.
- [9] Chinmay Samak, Tanmay Samak, and Sivanathan Kandhasamy. Control strategies for autonomous vehicles. 2020.

Lista de Figuras

2.1. El Vanguard 1.	3
2.2. Caída en dólares del precio por vatio en módulos solares desde 1976 a 2019.	4
2.3. Prototipo solar del Toyota Prius PHV.	5
2.4. Vehículo Zylog.	6
3.1. Diagrama de bloques en Simulink.	8
3.2. Soportes laterales empleados para sujetar los paneles solares.	9
3.3. Soportes centrales.	9
3.4. Modelo 3D del techo del Zylog.	10
3.5. Vistas del techo.	10
3.6. Modelo 3D del techo del Zylog con los cuatro paneles solares instalados.	11
3.7. Paneles solares instalados en el Zylog.	11
3.8. Conexión de los paneles, cargador solar y batería.	12
4.1. Localización del ensayo de pendiente.	17
5.1. Recorrido del ensayo n.º 1	21
5.2. Velocidades y pendientes ensayo 1	22
5.3. Potencia eléctrica desarrollada por el Zylog en el primer ensayo	23
5.4. Recorrido del ensayo n.º 2	24
5.5. Velocidades ensayo 2	25
5.6. Potencia eléctrica ensayo 2	25
5.7. Recorrido realizado para el ensayo 3	26

5.8. Velocidad registrada por el GPS para el ensayo 3	27
5.9. Altitudes registradas por el barómetro y el GPS en metros.	28
5.10. Medida de posición y altitud por GPS.	29
5.11. Comparación de valores proporcionados por GPS y barómetro.	29
5.12. Pendientes simples calculadas ensayo 3	30
5.13. Eliminación de falsos resultados en hoja de cálculo.	31
5.14. Pendientes corregidas ensayo 3	31
5.15. Radiación solar ensayo 3	32
5.16. Potencia suministrada por los paneles solares ensayo 3	33
5.17. Potencia eléctrica desarrollada por el Zylog ensayo 3	34
5.18. Tensión en las baterías a lo largo del ensayo 3	34
5.19. Tensión de trabajo en las baterías a lo largo del ensayo 3	35
6.1. Introducción de datos en el bloque <i>Repeating Table</i>	38
6.2. Fuerzas involucradas en el ensayo 1	39
6.3. Potencia eléctrica ensayo 1 con pendiente y potencia negativa debido al frenado regenerativo.	39
6.4. Resultados ensayo 1	40
6.5. Consumo estándar y con frenado regenerativo	40
6.6. Fuerzas involucradas en el ensayo 2	41
6.7. Potencia eléctrica ensayo 2 con potencia frenado regenerativo.	41
6.8. Resultados ensayo 2	42
6.9. Consumo estándar y con frenado regenerativo	42
6.10. Fuerzas involucradas en el ensayo 3 (1 vuelta)	43
6.11. Potencia eléctrica ensayo 3 con potencia frenado regenerativo y potencia de carga solar (1 vuelta).	43
6.12. Resultados ensayo 3	44
6.13. Consumo estándar y con frenado regenerativo y con recarga solar	44
7.1. Potencia teórica y experimental ensayo 3.	46

7.2. Comparación de consumos a partir de potencia experimental y teórica .	47
A.1. Detalle del techo del vehículo.	61
A.2. Vista superior y sección transversal del techo del vehículo.	62
A.3. Vista inferior y caja de conexiones (en negro) del panel solar semi-rígido.	63
A.4. Vistas del conjunto de sujeción n.º 1	64
A.5. Sección del conjunto de sujeción n.º 1 en su posición.	64
A.6. Vistas del conjunto de sujeción n.º 2	65
A.7. Detalle del conjunto de sujeción n.º 2	66
A.8. Vista general del conjunto de sujeción n.º 2	66
A.9. Vistas del conjunto de sujeción n.º 3	67
A.10. Detalle del conjunto de sujeción n.º 3	68
A.11. Vistas general del conjunto de sujeción n.º 3	68
A.12. Listones de aluminio de 20x2 mm.	69
A.13. Marcas realizadas sobre el perfil de aluminio	70
A.14. Pieza en forma de "z".	70
A.15. Piezas taladradas.	71
A.16. Importación del CAD al programa Ultimaker Cura.	71
A.17. Resultado de la impresión de los separadores.	72
A.18. Elementos.	72
A.19. Soporte central.	73
A.20. Vista en perspectiva de los paneles solares instalados.	73
A.21. Esquema eléctrico del sistema de carga solar.	74
A.22. Interruptor de seguridad para el circuito de carga solar.	75
B.1. Datos introducidos en el diagrama original.	78
B.2. Diagrama de bloques original.	78
B.3. Modelo teórico en Simulink	80
B.4. Tablas de pendientes y velocidades	82
B.5. Subsistema de cálculo de la fuerza de tracción.	82

B.6. Diagrama de bloques de cálculo de la fuerza de tracción.	83
B.7. Cálculo del seno de la pendiente.	83
B.8. Bloque "Mayor a cero"	84
B.9. Fuerza de inercia angular.	85
B.10.Fuerza aerodinámica.	85
B.11.Sumatorio de fuerzas y eliminación de valores negativos.	86
B.12.Cálculo del par motor, potencia y energía consumida por el vehículo.	87
B.13.Cálculo de la energía recuperada por frenado regenerativo.	88
B.14.Cálculo de la energía suministrada por los paneles solares.	89
B.15.Sumatorios de cálculos energéticos.	89
B.16.Desglose del cálculo de consumos.	90
B.17.Porcentajes de ahorro.	90
B.18.Resultados relacionados con el rendimiento del vehículo y las potencias involucradas en la simulación.	91

Lista de Tablas

7.1. Diferentes consumos ensayo 3	47
B.1. Definición de las variables empleadas en los cálculos.	77
B.2. Ejemplos de resistencia a la rodadura	84

