



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

## **Análisis de prestaciones y consumo de energía de un vehículo eléctrico industrial para aplicaciones de logística de distribución urbana**

Analysis of performance and energy consumption of an industrial electric vehicle for urban distribution logistics applications

Autor

Sergio Horcas Esteban

Directores

Emilio Larrodé Pellicer

Juan Bautista Arroyo García

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2019

## RESUMEN

---

### **Análisis de prestaciones y consumo de energía de un vehículo eléctrico industrial para aplicaciones de logística de distribución urbana.**

En este trabajo se ha realizado la puesta a punto del vehículo Zylog, fabricado por la empresa Zytel y actualmente perteneciente a la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

Este vehículo eléctrico está pensado para aplicaciones de logística de distribución urbana, lo que implica que debe tener las prestaciones adecuadas para el transporte de cargas y mercancías. Su comportamiento depende fundamentalmente del sistema de alimentación de energía a base de baterías y del peso de la carga que transporta.



*Ilustración 1: Vehículo eléctrico Zylog*

Se realizó un análisis teórico tanto cinemático como energético para conocer el supuesto comportamiento del Zylog durante los ensayos reales que se iban a realizar con él.

Una vez el vehículo se encontraba en condiciones de circular, se llevó a cabo la puesta en marcha para la realización de una serie de circuitos. Estos pretendían simular diferentes escenarios frente a los que podría encontrarse el Zylog en su aplicación como vehículo de reparto de mercancías.

Finalmente, se realizó un análisis de los resultados obtenidos y se llevó a cabo una comparativa con los cálculos teóricos. De este modo, se pudo tener constancia de las prestaciones reales del vehículo en cuanto a la velocidad, capacidad de carga, autonomía y consumo de energía en las condiciones de marcha correspondientes a las diferentes rutas de reparto simuladas.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

---

<b>Resumen .....</b>	<b>2</b>
<b>Capítulo 1: Introducción .....</b>	<b>12</b>
1.1. Introducción .....	12
1.2. Objetivo .....	14
1.3. Alcance .....	15
<b>Capítulo 2: Puesta a punto del vehículo y sus sistemas de medida .....</b>	<b>17</b>
2.1. Estado inicial del vehículo .....	17
2.2. Proceso de puesta a punto .....	18
2.2.1. Cambios realizados en taller .....	18
2.2.2. Sustitución de baterías .....	20
2.2.3. Conexión de las baterías a los circuitos del Zylog .....	22
2.3. Estado final del vehículo .....	24
<b>Capítulo 3: Análisis teórico de las prestaciones del vehículo frente a diferentes escenarios .....</b>	<b>25</b>
3.1. Análisis teórico cinemático .....	25
3.1.1. Análisis cinemático de los circuitos .....	27
3.2. Análisis teórico energético .....	32
3.2.1. Análisis energético de los circuitos con el vehículo en vacío .....	36
3.2.2. Comparativa del análisis energético de los circuitos con el vehículo en vacío y con carga .....	43
<b>Capítulo 4: Desarrollo de las pruebas reales de medida de autonomía y consumos .....</b>	<b>47</b>
<b>Capítulo 5: Comprobación de resultados y comparativa de medidas .....</b>	<b>51</b>
5.1. Análisis cinemático .....	51
5.1.1. Resultados cinemáticos en los ensayos reales .....	52
5.1.2. Comparativa entre resultados reales y teóricos .....	54
5.2. Análisis energético .....	57
5.2.1. Resultados energéticos en los ensayos reales .....	57
5.2.1.1. Ensayos sin carga .....	57

5.2.1.2. Ensayos con carga .....	67
5.2.1.3. Ensayo de agotamiento de baterías .....	74
5.2.2. Comparativa entre resultados reales y teóricos .....	75
5.2.3. Resultados en los procesos de carga .....	80
<b>Capítulo 6: Conclusiones .....</b>	<b>82</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>84</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>85</b>
Anexo 1: Circuitos .....	85
Anexo 2: Aparatos y dispositivos .....	93

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 1: Vehículo eléctrico Zylog .....	2
Ilustración 2: Estado inicial Zylog .....	17
Ilustración 3: Freno trasero en mal estado .....	19
Ilustración 4: Depósito de líquido de frenos .....	19
Ilustración 5: Neumático inicial .....	19
Ilustración 6: Neumático nuevo .....	19
Ilustración 7: Baterías iniciales .....	20
Ilustración 8: Cajón compartimentado para baterías .....	20
Ilustración 9: Conector baterías .....	21
Ilustración 10: Nuevas baterías montadas en el Zylog .....	21
Ilustración 11: Cables que componen cada mazo de conexión .....	22
Ilustración 12: Sensor Hall .....	23
Ilustración 13: Instalación del sensor Hall .....	23
Ilustración 14: Estado final Zylog .....	24
Ilustración 15: Circuito 1, trayecto en recta .....	27
Ilustración 16: Circuito 2, trayecto en rampa .....	28
Ilustración 17: Circuito 3, trayecto con curvas .....	30
Ilustración 18: Proceso de tara Zylog .....	33
Ilustración 19: Resultados tara Zylog .....	33
Ilustración 20: Cajón de carga Zylog .....	48
Ilustración 21: Neumático deformado Zylog cargado .....	48
Ilustración 22: Temperatura motor .....	49
Ilustración 23: Temperatura controlador .....	49
Ilustración 24: Batería Zylog tras ensayo de agotamiento de baterías .....	50
Ilustración 25: Emplazamiento de los circuitos .....	85
Ilustración 26: Ubicación Circuito 1 .....	86
Ilustración 27: Circuito 1, trayecto en recta .....	86
Ilustración 28: Dimensiones Circuito 1 .....	87

Ilustración 29: Desnivel Circuito 1 .....	88
Ilustración 30: Ubicación Circuito 2 .....	89
Ilustración 31: Circuito 2, trayecto en rampa .....	89
Ilustración 32: Dimensiones Circuito 2 .....	90
Ilustración 33: Desnivel Circuito 2 .....	90
Ilustración 34: Ubicación Circuito 3 .....	91
Ilustración 35: Circuito 3, trayecto con curvas .....	91
Ilustración 36: Dimensiones Circuito 3 .....	92
Ilustración 37: Partes del registrador USB-5106 .....	93
Ilustración 38: Entradas de las sondas al dispositivo .....	93
Ilustración 39: Sondas de adaptación de la tensión de entrada al dispositivo .....	94
Ilustración 40: Sensor Hall .....	96
Ilustración 41: Instalación sensor Hall en el Zylog .....	97
Ilustración 42: Plano sensor Hall .....	97
Ilustración 43: Partes y componentes SMART CHARGER .....	98
Ilustración 44: Inicio del proceso de carga .....	99
Ilustración 45: Instrucciones y display del dispositivo .....	100

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica 1: Evolución del precio del petróleo .....	12
Gráfica 2: Velocidad teórica Circuito 1 .....	28
Gráfica 3: Velocidad teórica Circuito 2 .....	29
Gráfica 4: Velocidad teórica Circuito 3 .....	31
Gráfica 5: Potencia instantánea teórica Circuito 1 .....	36
Gráfica 6: Velocidad media teórica Circuito 1 .....	36
Gráfica 7: Resistencias al avance teóricas Circuito 1 .....	37
Gráfica 8: Balance energético teórico Circuito 1 .....	37
Gráfica 9: Potencia instantánea teórica Circuito 2 .....	38
Gráfica 10: Velocidad media teórica Circuito 2 .....	38
Gráfica 11: Resistencias al avance teóricas Circuito 2 .....	39
Gráfica 12: Balance energético teórico Circuito 2 .....	39
Gráfica 13: Potencia instantánea teórica Circuito 3 .....	40
Gráfica 14: Velocidad media teórica Circuito 3 .....	40
Gráfica 15: Resistencias al avance teóricas Circuito 3 .....	41
Gráfica 16: Balance energético teórico Circuito 3 .....	41
Gráfica 17: Balance energético teórico por vuelta ensayo sin carga .....	42
Gráfica 18: Comparativa potencia instantánea teórica Circuito 1 .....	43
Gráfica 19: Comparativa balance energético teórico Circuito 1 .....	43
Gráfica 20: Comparativa potencia instantánea teórica Circuito 2 .....	44
Gráfica 21: Comparativa balance energético teórico Circuito 2 .....	44
Gráfica 22: Comparativa potencia instantánea teórica Circuito 3 .....	45
Gráfica 23: Comparativa balance energético teórico Circuito 3 .....	45
Gráfica 24: Velocidad real ensayos sin y con carga Circuito 1 .....	52
Gráfica 25: Velocidad real ensayos sin y con carga Circuito 2 .....	53
Gráfica 26: Velocidad real ensayos sin y con carga Circuito 3 .....	54
Gráfica 27: Velocidad real y teórica Circuito 1 .....	55
Gráfica 28: Velocidad real y teórica Circuito 2 .....	55



Gráfica 29: Velocidad real y teórica Circuito 3 .....	56
Gráfica 30: Tensiones registradas USB-5106 ensayo sin carga .....	58
Gráfica 31: Tensión e intensidad ensayos sin carga .....	58
Gráfica 32: Tensión e intensidad ensayo sin carga Circuito 3 .....	59
Gráfica 33: Tensión e intensidad ensayo sin carga Circuito 1 .....	60
Gráfica 34: Tensión e intensidad por vuelta ensayo sin carga Circuito 1 .....	60
Gráfica 35: Potencia instantánea ensayo sin carga Circuito 1 .....	62
Gráfica 36: Tensión e intensidad ensayo sin carga Circuito 2 .....	63
Gráfica 37: Tensión e intensidad por vuelta ensayo sin carga Circuito 2 .....	63
Gráfica 38: Potencia instantánea ensayo sin carga Circuito 2 .....	64
Gráfica 39: Tensión e intensidad por vuelta ensayo sin carga Circuito 3 .....	65
Gráfica 40: Potencia instantánea ensayo sin carga Circuito 3 .....	66
Gráfica 41: Balance energético real ensayos sin carga .....	66
Gráfica 42: Tensión e intensidad ensayos con carga .....	67
Gráfica 43: Tensión e intensidad por vuelta ensayo con carga Circuito 1 .....	68
Gráfica 44: Potencia ensayos con y sin carga Circuito 1 .....	69
Gráfica 45: Tensión e intensidad por vuelta ensayo con carga Circuito 2 .....	70
Gráfica 46: Potencia ensayos con y sin carga Circuito 2 .....	70
Gráfica 47: Tensión e intensidad por vuelta ensayo con carga Circuito 3 .....	71
Gráfica 48: Potencia ensayos con y sin carga Circuito 3 .....	72
Gráfica 49: Balance energético real ensayos con carga .....	72
Gráfica 50: Balance energético real por kilómetro ensayos con carga .....	73
Gráfica 51: Tensión e intensidad ensayo agotamiento de baterías .....	74
Gráfica 52: Potencia real y teórica Circuito 1 .....	75
Gráfica 53: Balance energético real y teórico sin carga Circuito 1 .....	75
Gráfica 54: Balance energético real y teórico con carga Circuito 1 .....	76
Gráfica 55: Potencia real y teórica Circuito 2 .....	77
Gráfica 56: Balance energético real y teórico sin carga Circuito 2 .....	77
Gráfica 57: Balance energético real y teórico con carga Circuito 2 .....	77
Gráfica 58: Potencia real y teórica Circuito 3 .....	78

Gráfica 59: Balance energético real y teórico sin carga Circuito 3 .....	79
Gráfica 60: Balance energético real y teórico con carga Circuito 3 .....	79
Gráfica 61: Tensión e intensidad proceso de carga .....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Circuitos .....	15
Tabla 2: Características Circuito 1 .....	27
Tabla 3: Velocidades consideradas Circuito 1 .....	27
Tabla 4: Tiempos de aceleración y frenada considerados Circuito 1 .....	27
Tabla 5: Características Circuito 2 .....	29
Tabla 6: Velocidades consideradas Circuito 2 .....	29
Tabla 7: Tiempos de aceleración y frenada considerados Circuito 2 .....	29
Tabla 8: Características Circuito 3 .....	31
Tabla 9: Velocidades consideradas Circuito 3 .....	31
Tabla 10: Tiempos de aceleración y frenada considerados Circuito 3 .....	31
Tabla 11: Especificaciones USB-5106 Logger .....	95
Tabla 12: Características sensor Hall .....	98
Tabla 13: Tiempo medio de carga SMART CHARGER .....	100
Tabla 14: Especificaciones SMART CHARGER .....	101

# CAPÍTULO 1:

## INTRODUCCIÓN

---

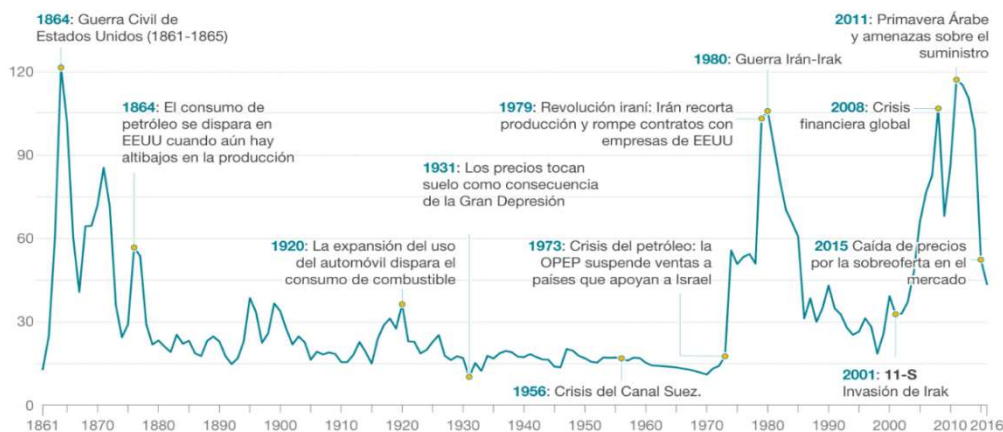
### 1.1. Introducción

La movilidad eléctrica se ha convertido en uno de los temas de mayor interés actual, afectando de manera directa sobre el mundo del automóvil. Su desarrollo implicará cambios muy significativos no solo para las empresas fabricantes de vehículos sino también para toda la sociedad.

Los vehículos eléctricos son el futuro del transporte. Explicado simple y brevemente, un vehículo eléctrico es aquel que funciona gracias a la tracción de un motor eléctrico en lugar del habitual motor de gasolina o diésel.

Los coches eléctricos no son nada nuevo. Hacia 1900, el interés por estos vehículos aumentó considerablemente, y los coches eléctricos llegaban a duplicar a los de gasolina o diésel. Presentaban una gran cantidad de ventajas frente a los coches de gasolina, sobre todo en cuanto a limpieza, comodidad y facilidad de uso. Dos décadas más tarde, en 1920, debido principalmente a las limitaciones en cuanto a velocidad y autonomía, se empezó a perder interés en este tipo de vehículos. Además, la llegada de Henry Ford y la producción en serie del modelo Ford T, dio lugar a una reducción del precio de los automóviles de gasolina a aproximadamente la mitad del de uno eléctrico. Esto significó que los fabricantes comenzaran a dejar de fabricarlos. El interés por los coches eléctricos volvió a despertar con la crisis de la energía en los años 70 [1].

En las últimas décadas, el aumento del precio del petróleo, la limitación de la eficiencia de los motores de gasolina o diésel y el impacto ambiental debido a las emisiones ocasionadas por los vehículos de motor de combustión [2], hace que el interés por la movilidad eléctrica haya incrementado considerablemente y que el mundo de los vehículos eléctricos se encuentre en profundo desarrollo.



Gráfica 1: Evolución del precio del petróleo [3]

En la actualidad, podemos diferenciar principalmente entre tres tipos de vehículos eléctricos, los vehículos híbridos enchufables (PHEV), los vehículos eléctricos de autonomía extendida (EREV) y los vehículos eléctricos de batería (BEV) [4]. El vehículo que se va a estudiar a lo largo del proyecto se encuentra dentro de este último grupo, los vehículos eléctricos de batería.

Pese a la viabilidad de los vehículos eléctricos, existen todavía muchos aspectos a mejorar. Uno de los problemas fundamentales es la autonomía. El hecho de que los vehículos eléctricos de la actualidad tengan un alcance por debajo de los de motor de combustión, se debe principalmente a las baterías. Las baterías utilizadas actualmente han de evolucionar y mejorar en aspectos como la reducción de los tiempos de recarga, el aumento de la densidad energética, aumentar el número de ciclos de carga y descarga... para conseguir ponerse al nivel de los vehículos de motor de combustión [2]. Por ello, pese a que los vehículos eléctricos se encuentren en pleno desarrollo, todavía tardarán en desbancar a los vehículos basados en combustibles fósiles.

Grandes marcas apuestan y dedican gran parte de su dinero en investigación y desarrollo dentro de este campo, pero aún queda mucho camino por recorrer en cuanto al desarrollo de los vehículos eléctricos [2].

## **1.2. Objetivo**

Como objetivo de este trabajo, se pretende llevar a cabo la puesta a punto del Zylog, un vehículo eléctrico alimentado por medio de baterías empleado para la logística de mercancías en el entorno urbano. Se trata de conseguir que el vehículo quede operativo tras un largo periodo de inactividad para posteriormente analizar su funcionamiento.

Hecho esto, se realizarán los ensayos y simulaciones tanto teóricas como prácticas correspondientes para ver el comportamiento del vehículo frente a las situaciones en las que podría verse durante su vida útil. El Zylog se enfrentará a diferentes escenarios que pondrán a prueba sus prestaciones realizando las pruebas reales tanto en vacío como con carga.

Una vez realizadas dichas pruebas, se realizará una comparativa entre los estudios teóricos y los datos reales recabados, con el fin de analizar las prestaciones en cuanto a velocidad, capacidad de carga, autonomía y consumo de energía, y ver la viabilidad del empleo de este tipo de vehículos para la realización de tareas logísticas de distribución urbana.

### 1.3. Alcance

Durante el proyecto, se ha llevado a cabo la puesta a punto del Zylog. Se realizó un análisis teórico a nivel cinemático y energético sobre tres escenarios: comportamiento del vehículo en recta, comportamiento en rampa y comportamiento con curvas.

Además, se han llevado a cabo ensayos experimentales en tres circuitos: Trayecto en recta, trayecto en rampa y trayecto con curvas. Estos ensayos se han realizado con el vehículo en vacío y con el vehículo cargado.

Posteriormente, se han analizado los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y se han comparado con el análisis teórico.

En la siguiente tabla se especifican los tres circuitos en los que se han realizado los ensayos.

*Tabla 1: Circuitos*

<b>CIRCUITOS</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Circuito 1: Trayecto en recta. Realizado en el parking norte del Campus Río Ebro.</li><li>• Circuito 2: Trayecto en rampa. Realizado en la salida norte del Campus Río Ebro.</li><li>• Circuito 3: Trayecto con curvas. Realizado entre las naves de investigación del Campus Río Ebro.</li></ul>

El trabajo se ha estructurado según una serie de capítulos que han sido llevados a cabo secuencialmente a lo largo de la evolución del proyecto. A continuación, se enuncian y se describen de forma concisa cada uno de ellos:

- Capítulo 1: Introducción  
Breve introducción sobre los vehículos eléctricos. Descripción del objetivo y el alcance del proyecto.
- Capítulo 2: Puesta a punto del vehículo y de sus sistemas de medida  
Revisión del estado inicial del vehículo. Valoración y ejecución de las medidas y acciones necesarias para su puesta a punto.
- Capítulo 3: Análisis teórico de las prestaciones del vehículo frente a diversos escenarios  
Realización de cálculos teóricos a nivel cinemático y energético para conocer el supuesto comportamiento del vehículo frente a diferentes escenarios.

- Capítulo 4: Desarrollo de las pruebas reales de medida de autonomía y consumos  
Realización de los ensayos reales en los diferentes circuitos planteados para medir el comportamiento real del vehículo tanto en vacío como en carga.
- Capítulo 5: Comprobación de resultados y comparativa de medidas  
Análisis de los resultados obtenidos en las pruebas reales llevadas a cabo y comparación con los cálculos teóricos realizados inicialmente.
- Capítulo 6: Conclusiones  
Análisis y conclusiones finales de los resultados obtenidos. Posibilidades de mejora y de ampliación del proyecto. Valoración personal del trabajo realizado.

Para cumplimentar la memoria se adjuntan dos anexos cuyo contenido es el siguiente:

- Anexo 1: Circuitos.  
Caracterización de cada uno de los circuitos en los que se han llevado a cabo las pruebas reales.
- Anexo 2: Aparatos y dispositivos.  
Descripción de las características y funcionamiento de los aparatos más relevantes utilizados a lo largo del proyecto.



## CAPÍTULO 2:

# PUESTA A PUNTO DEL VEHÍCULO Y SUS SISTEMAS DE MEDIDA

---

### 2.1. Estado inicial del vehículo

El Zylog es un vehículo eléctrico que fue creado por Zytel con la colaboración de la Universidad de Zaragoza. Zytel es una empresa que surgió a partir del Grupo Zytech, dedicada al diseño y fabricación de vehículos eléctricos. Uno de los proyectos que pusieron en marcha junto con la Universidad de Zaragoza fue la elaboración de un vehículo para la distribución de mercancías urbanas, y el resultado fue la fabricación del Zylog. Pese a estar ya fabricado, este vehículo nunca llegó a ponerse en marcha ya que el proyecto fue abandonado. A partir de ahí, la Universidad de Zaragoza adquirió el vehículo para continuar por su cuenta con el proyecto.

El vehículo ha estado inactivo durante varios años y al comenzar el proyecto, se encontraba aparcado en una de las naves de investigación del Campus Río Ebro.



*Ilustración 2: Estado inicial Zylog*

Los principales inconvenientes del estado en el que se encontraba el vehículo eran los siguientes:

- Las baterías estaban completamente descargadas tras el largo periodo de inactividad.
- Las ruedas del vehículo no tenían las prestaciones adecuadas para llevar a cabo operaciones de transporte de mercancías.
- El freno trasero derecho requería ser sustituido o reparado debido a la oxidación y al mal estado en el que se encontraba.

## **2.2. Proceso de puesta a punto**

Una vez conocida la situación de partida, se valoraron diferentes alternativas para la puesta a punto del vehículo.

En cuanto a las baterías, debido al largo periodo de inactividad que habían tenido, se planteó sustituirlas por otras que inicialmente se encontraban montadas en otro vehículo eléctrico de características similares. Respecto a las ruedas, se buscaron posibles negocios que pudieran suministrar un tipo de neumático con las prestaciones necesarias para un uso del vehículo como medio de transporte de mercancías. También se entró en contacto con diferentes desguaces y casas de repuestos como Oscar, Bolca o Desguaces La Cabaña en busca de un repuesto para el freno de tambor trasero.

La idea de sustituir las baterías por las del otro vehículo siguió adelante ya que eran más nuevas y se encontraban en buen estado. Por otro lado, ante la dificultad de encontrar repuesto para los neumáticos y el freno de tambor, se optó por llevar el vehículo a un taller.

### **2.2.1. Cambios realizados en taller**

El vehículo se trasladó en grúa al taller Autoterreno Sport. Durante su estancia allí se llevaron a cabo las siguientes operaciones:

#### 1) Reparación del freno

Se reparó el freno de tambor trasero del vehículo. Se quitaron los restos de óxido y se arregló para dejarlo en buen estado y que funcionara adecuadamente. También se rellenó el depósito de líquido de frenos y se comprobó que el circuito hidráulico encargado de empujar las zapatas contra el tambor cumplía con su función y el vehículo frenaba correctamente.



*Ilustración 3:  
Freno trasero en mal estado*



*Ilustración 4: Depósito de líquido de frenos*

## 2) Sustitución de los neumáticos

Se consiguió encontrar un neumático de las dimensiones adecuadas para el Zylog y las características necesarias para el transporte de mercancías. El nuevo neumático se caracterizaba por ser más duro y más estrecho que el original.



*Ilustración 5: Neumático inicial*



*Ilustración 6: Neumático nuevo*

Debido a que los nuevos neumáticos eran más estrechos, se planteó añadir unos extensores en la parte interna de las ruedas para que quedaran a la misma altura que los originales. Debido al presupuesto y a que se trataba de un complemento meramente estético, finalmente se optó por no ponerlos.

### 2.2.2. Sustitución de baterías

Una vez que el vehículo regresó del taller, se puso en marcha el proceso de cambiar las baterías originales por unas más nuevas y en mejor estado. El vehículo requiere de 8 baterías de 6 V para funcionar. Se caracterizan por ser baterías de plomo-ácido conectadas en serie para proporcionar los 48 V necesarios para el funcionamiento del motor.

En primer lugar, se retiraron las ocho baterías en mal estado que el vehículo tenía inicialmente montadas. Para ello, se desmontaron los conectores y la tornillería correspondiente, y se extrajeron del cajón compartimentado bajo el asiento del conductor. Además de estar descargadas, se observó que las baterías estaban hinchadas.



*Ilustración 7: Baterías iniciales*



*Ilustración 8: Cajón compartimentado para baterías*

Tal y como se ha mencionado anteriormente, las baterías que se iban a utilizar se encontraban montadas en otro vehículo, un carrito de golf de características similares al Zylog. Una vez con las baterías ya desmontadas, se limpiaron los restos de suciedad y antimonio acumulados en la parte superior cercana a los bornes ya que la presencia de este elemento puede dar lugar a un cortocircuito. Finalmente, antes de montar estas baterías en el Zylog, se realizó un proceso de carga para dejarlas en estado óptimo.

Una vez que las baterías estaban cargadas, se revisó que el nivel de electrolito era el adecuado. Estas baterías se caracterizan por ser de mantenimiento, y la cantidad de electrolito ha de ser revisada ya que tras un largo tiempo de inactividad, este puede ir evaporándose a causa de factores como la temperatura. Si el nivel de electrolito no es el apropiado, se puede rellenar para dejar de nuevo la batería en buen estado y que funcione correctamente.

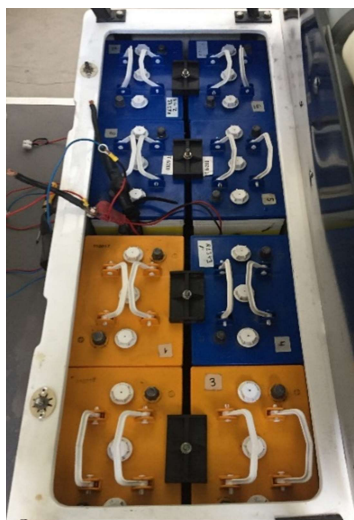
Previamente a montar las baterías en el vehículo, se realizó un estudio de su disposición en el cajón para poder aprovechar los conectores originales de las nuevas baterías. Se observó, que en la posición original en la que estaban montadas las baterías antiguas, los conectores no tenían la longitud suficiente para poder conectar los bornes con comodidad. Por ello, se decidió dar la vuelta a todas las baterías. De este modo, se facilitaba la conexión entre bornes con los cables originales.

De todos modos, fue necesario crear algún cable nuevo ya que no se tenían suficientes para conectar las ocho baterías. Para ello, se cortó con una sierra el tramo necesario y se pelaron los extremos con un cúter. Una vez teníamos los tramos de cable necesarios, se montaron los terminales necesarios para llevar a cabo la conexión entre bornes de las baterías.



*Ilustración 9: Conector baterías*

Hecho esto, todo estaba listo para instalar las nuevas baterías en el vehículo. De este modo, las baterías se montaron en el cajón compartimentado y se conectaron entre sí con los conectores preparados previamente. El próximo paso será entonces la conexión del conjunto de baterías a los circuitos del Zylog.



*Ilustración 10: Nuevas baterías montadas en el Zylog*

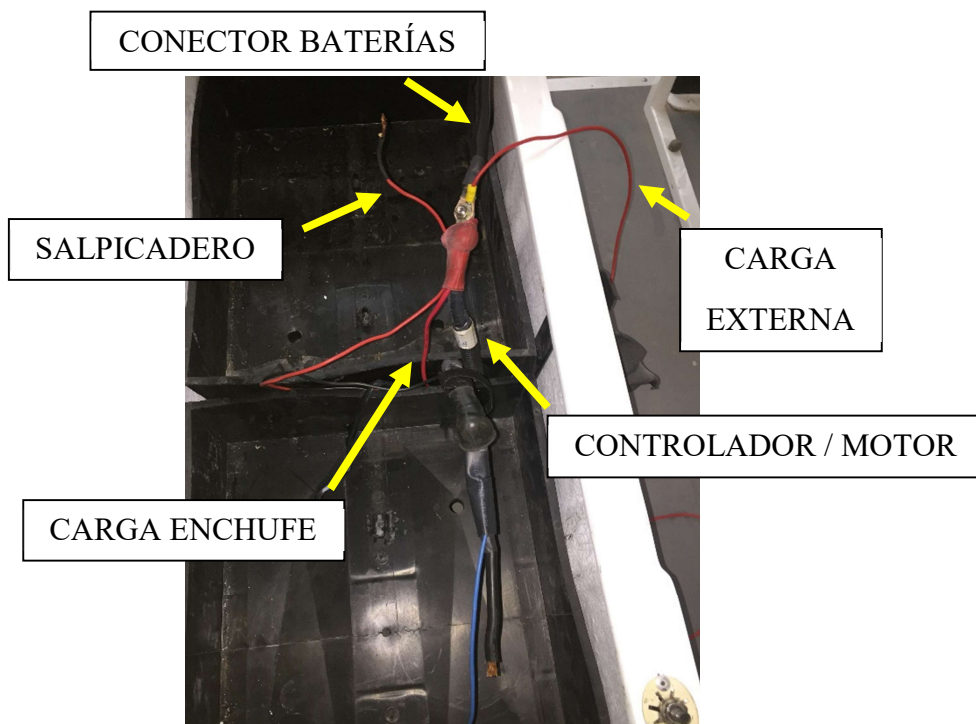
### 2.2.3. Conexión de las baterías a los circuitos del Zylog

En el cajón en el que iban montadas las baterías encontramos dos mazos de cables que conectan el conjunto de las 8 baterías a los diferentes circuitos del vehículo.

En cada mazo, el rojo de tensión y el negro de tierra, podemos distinguir los siguientes cables:

- Conector que une el conjunto de baterías con el mazo de cables.
- Cable de mayor grosor que conecta las baterías con el controlador/motor del Zylog.
- Cable para la carga de baterías por medio de la conexión a través del enchufe del vehículo.
- Cable de conexión entre las baterías y los elementos del salpicadero.
- Cable auxiliar para cargar las baterías de manera externa. Por ejemplo, por medio de una fuente, lo que facilita la realización de pruebas y ensayos.

Para que la zona de conexión de todos los cables quedase bien aislada y evitar posibles contactos eléctricos, se utilizaron pequeños tramos de tubo termoretráctil de modo que todas las partes metálicas quedaran bien cubiertas. En la siguiente imagen se señalan cada uno de los cables descritos anteriormente que forman parte en este caso del mazo rojo.



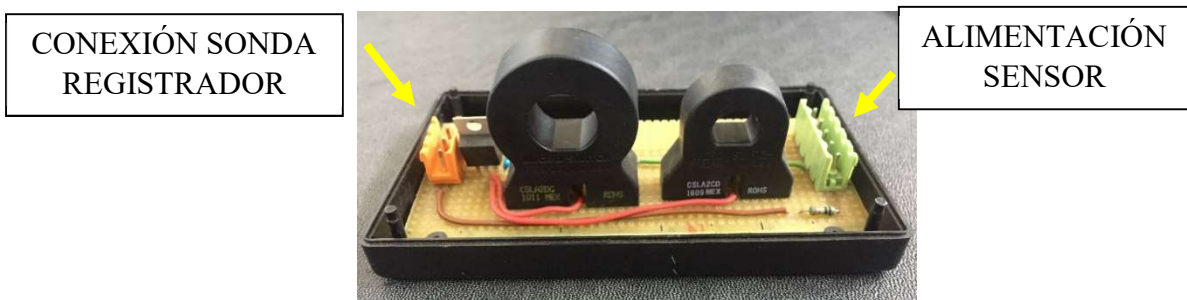
*Ilustración 11: Cables que componen cada mazo de conexión*

Una vez con todas las baterías montadas, en la zona de los conectores de entrada y salida de las baterías se colocó un sensor Hall, descrito en el Anexo 2: Aparatos y dispositivos.

Por medio de este dispositivo, se medirá la intensidad de las baterías tanto durante la realización de los ensayos, como durante los procesos de carga del vehículo.

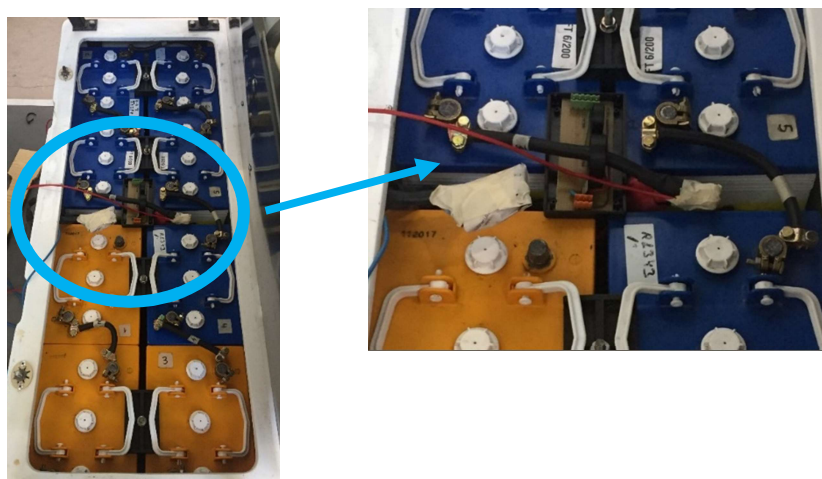
Haciendo pasar por el toroide el cable del que se quiere medir la intensidad, medimos una tensión proporcional a dicha intensidad. Posteriormente, realizando los cálculos correspondientes según los parámetros del dispositivo, se conocerá la corriente que circula por el conductor.

Para llevar a cabo las mediciones en el Zylog, se cuenta con dos sensores Hall sobre una misma placa de conexión. Junto a ellos encontramos una ficha para la alimentación de los sensores, y otra para la conexión de la sonda del registrador USB-5106 para el almacenamiento de datos.



*Ilustración 12: Sensor Hall*

Pese a contar con dos sensores, únicamente se utilizó uno debido a la dificultad de conseguir pasar los cables correspondientes por los toroides. De este modo, el sensor se montó de forma que el cable de las baterías correspondiente al borne positivo, pasara por el interior del toroide de mayor tamaño.



*Ilustración 13: Instalación del sensor Hall*

A la hora de conectar los bornes finales que cerraban el circuito de las baterías nos encontramos ante un problema inesperado, aparecía intensidad con el vehículo apagado. Para averiguar el por qué de este suceso, se dejaron las baterías desconectadas y se alimentó el vehículo a través de una fuente externa.

Por medio de un polímetro, se observó que al cerrar el circuito había un pico de intensidad de 200 mA que posteriormente bajaba rápidamente hasta 2 mA. Esto hacía ver que había algún componente que demandaba corriente nada más cerrar el circuito aún con el vehículo apagado. La hipótesis que se planteó fue la posibilidad de que el condensador del controlador se cargara nada mas cerrar el circuito.

El ensayo que se llevo a cabo para confirmar esta hipótesis, consistió en dejar únicamente conectado el cable de carga externa y el del controlador/motor, y desconectar el resto de cables del mazo rojo. Se alimentó con la fuente y al abrir el circuito, se observó que la tensión iba descendiendo paulatinamente hasta 0 V. Esto confirmaba la existencia de un condensador en el controlador que se carga al cerrar el circuito, produciendo un pico de intensidad limitado por la resistencia interna del condensador. Este pico de intensidad es el que produce la intensidad inicial al cerrar la conexión de las baterías.

Una vez visto que la intensidad inicial que se producía al cerrar el circuito de las baterías no era peligrosa ni dañina para el vehículo, se conectó pese al chispazo inicial.

### **2.3. Estado final del vehículo**

Una vez finalizado el proceso de puesta a punto, el vehículo contaba con unos neumáticos aptos para el transporte de mercancías, el freno trasero reparado y las baterías cargadas.

De este modo, el Zylog ya se encontraba en disposición de circular y realizar los ensayos reales en los diferentes circuitos para poner a prueba sus prestaciones y observar su comportamiento.



*Ilustración 14: Estado final Zylog*



## **CAPÍTULO 3:**

# **ANÁLISIS TEÓRICO DE LAS PRESTACIONES DEL VEHÍCULO FRENTE A DIFERENTES ESCENARIOS**

---

A la par que se llevaba a cabo la puesta a punto del Zylog, se realizó un análisis teórico de las prestaciones y el comportamiento del vehículo ante diferentes escenarios.

Este estudio consistió en un análisis cinemático y energético del vehículo en los circuitos que se van a realizar posteriormente en las pruebas reales, detallados en el Anexo 1: Circuitos. Con este análisis se intenta estimar la respuesta del Zylog ante:

- Circuito 1: Trayecto en recta. Trata de simular un comportamiento similar al de carretera. Se trata de un circuito en el que se pueden alcanzar velocidades elevadas y hay un número pequeño de curvas.
- Circuito 2: Trayecto en rampa. Analiza el comportamiento del vehículo ante una pendiente.
- Circuito 3: Trayecto con curvas. Simula el comportamiento en un entorno urbano. A lo largo del circuito encontramos curvas con alta frecuencia y el vehículo tiene que estar constantemente acelerando y frenando.

Es importante mencionar que una vez hechos los ensayos reales, los datos que fueron estimados como punto de partida para los cálculos teóricos fueron reajustados a valores similares a los obtenidos en las pruebas. De este modo los cálculos teóricos se ajustan más a los ensayos reales y la comparativa entre resultados es más exacta.

### **3.1. Análisis teórico cinemático**

El análisis teórico cinemático se basa en el planteamiento de las curvas Velocidad – Tiempo a lo largo de una vuelta en los diferentes recorridos. Previamente, hubo que llevar a cabo un estudio del circuito para conocer sus dimensiones totales, longitudes de los diferentes tramos, desnivel... y segmentarlo de modo que se facilitara el análisis.

A continuación, se va a realizar una breve descripción del procedimiento seguido.

Como normal general para el análisis de todos los circuitos, se consideró que las curvas se realizaban a velocidad constante y todas las rectas se dividieron en 3 tramos: uno primero de aceleración, otro de velocidad constante y uno final de frenada o deceleración.

Como datos de partida se estimaron las velocidades en las diferentes rectas y curvas de los circuitos, y los tiempos de aceleración y frenada para pasar de unas velocidades a otras. Fueron estos valores los que una vez realizadas las pruebas prácticas, se variaron conforme a los resultados reales obtenidos, de modo que los resultados teóricos y los de los ensayos guardasen una mayor similitud.

Se hizo uso de la siguiente formulación, correspondiente al movimiento rectilíneo uniforme (MRU), y uniformemente acelerado (MRUA):

$$v[m/s] = \frac{d[m]}{t[s]}$$

$$a[m/s^2] = \frac{v[m/s]}{t[s]}$$

$$d[m] = \frac{1}{2} * a[m/s^2] * t[s]^2 + v_o[m/s] * t + d_o[m]$$

Conociendo las velocidades en los diferentes tramos de los circuitos y los tiempos en pasar de una velocidad a otra, por medio de la formulación se obtiene la aceleración/deceleración del vehículo, y la distancia recorrida durante esos tramos de aceleración o frenada.

Sabiendo la distancia recorrida en los tramos de MRUA, sabiendo la longitud de las diferentes rectas y curvas del circuito, y habiendo supuesto como dato la velocidad constante alcanzada en dichos tramos, se puede conocer el tiempo tomado en los tramos de MRU.

De este modo, se logra conocer el tiempo y el espacio recorrido tanto en los momentos de MRU como MRUA, y podemos obtener las gráficas Velocidad – Tiempo por vuelta en los circuitos. A continuación, se exponen los resultados obtenidos.

### 3.1.1. Análisis cinemático de los circuitos

- **Circuito 1: Trayecto en recta**

Tal y como se expone en el Anexo 1: Circuitos, el primer recorrido es un parking público exterior rectangular. Como ya se ha comentado anteriormente, con este circuito se trata de simular el comportamiento en carretera, ya que hay pocas curvas y se pueden alcanzar altas velocidades. A continuación, se muestra una imagen con los diferentes tramos del circuito indicando en verde las zonas de aceleración, en amarillo los tramos de velocidad constante, y en rojo las frenadas o deceleraciones.



Ilustración 15: Circuito 1, trayecto en recta

Tabla 2: Características Circuito 1

CARACTERÍSTICAS DEL CIRCUITO	
LONGITUD TOTAL RECORRIDO	420 m
<ul style="list-style-type: none"> <li>• LONGITUD RECTA LARGA</li> <li>• LONGITUD RECTA CORTA</li> </ul>	153 m 57 m
DESNIVEL	2 m
NÚMERO DE CURVAS	4

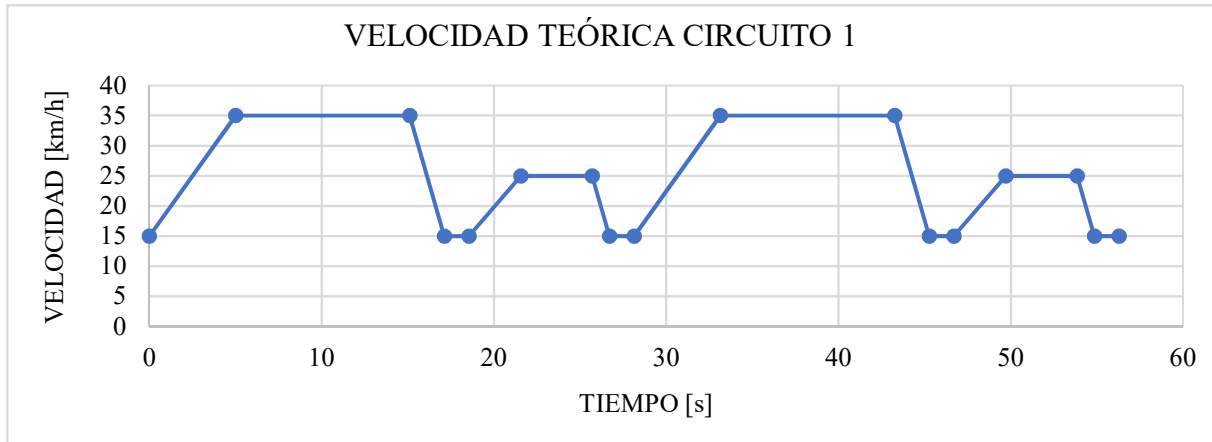
Tabla 3: Velocidades consideradas Circuito 1

VELOCIDADES	
RECTA LARGA	35 km/h
RECTA CORTA	25 km/h
CURVA	15 km/h

Tabla 4: Tiempos de aceleración y frenada considerados Circuito 1

TIEMPOS DE ACELERACIÓN / FRENADA	
ACELERACIÓN	
DE 15 km/h A 35 km/h	5 s
DE 15 km/h A 25 km/h	3 s
FRENADA	
DE 35 km/h A 15 km/h	2 s
DE 25 km/h A 15 km/h	1 s

Siguiendo el procedimiento de cálculo descrito anteriormente, se obtuvo la gráfica Velocidad - Tiempo correspondiente a este circuito.



Gráfica 2: Velocidad teórica Circuito 1

En la Gráfica 2 se puede apreciar la variación de la velocidad teórica a lo largo de una vuelta al parking, y el tiempo teórico empleado en hacerlo es de aproximadamente 56 segundos. La velocidad máxima se alcanza en las rectas largas y toma un valor de 35 km/h. Además, se pueden observar claramente las 4 deceleraciones a la hora de tomar las curvas tras los tramos de recta.

- **Circuito 2: Trayecto en rampa**

El segundo circuito consiste en subir y bajar una rampa con una pendiente aproximada del 6.5 % para ver el comportamiento del vehículo ante este escenario.

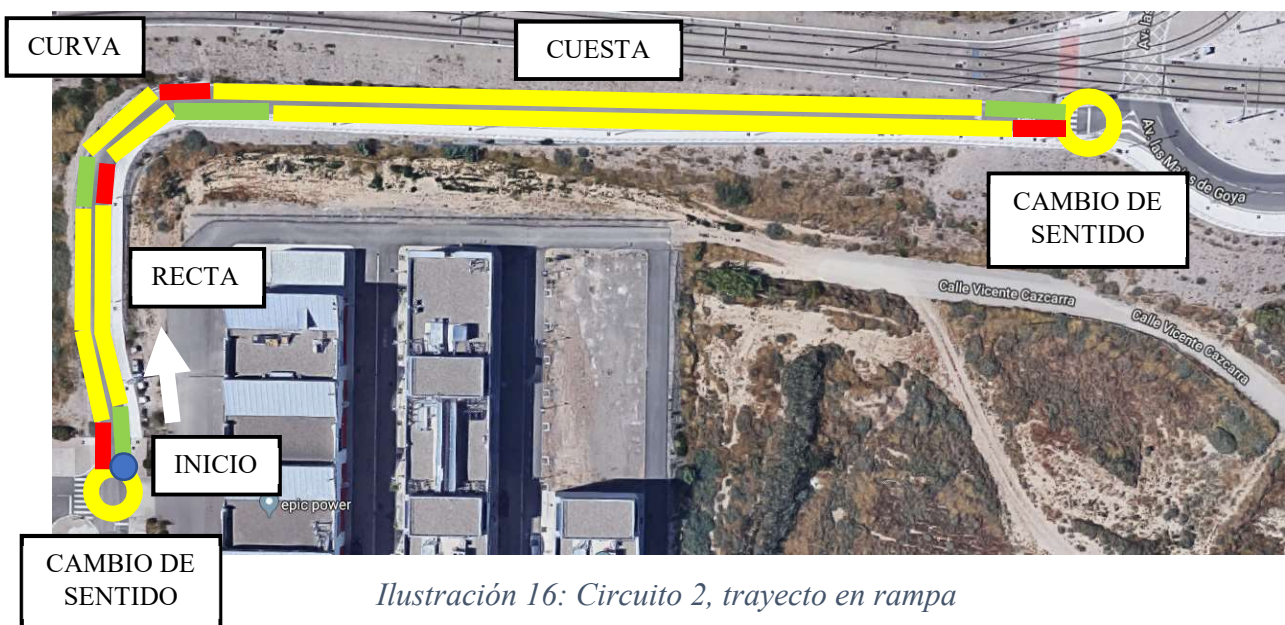


Ilustración 16: Circuito 2, trayecto en rampa

Tabla 5: Características Circuito 2

CARACTERÍSTICAS DEL CIRCUITO	
LONGITUD TOTAL RECORRIDO	490 m
LONGITUD RECTA INICIAL	57 m
LONGITUD CURVA	15 m
LONGITUD CUESTA	165 m
CAMBIO DE SENTIDO	8 m
DESNIVEL	13 m
NÚMERO DE CURVAS	4

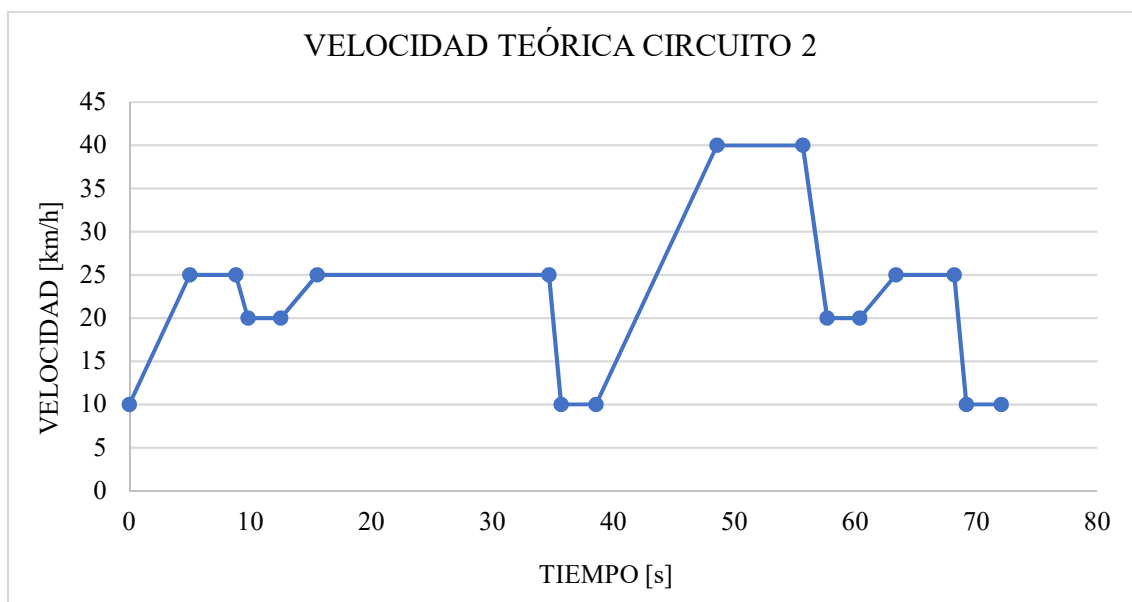
Tabla 6: Velocidades consideradas Circuito 2

VELOCIDADES	
RECTA INICIAL	25 km/h
CURVA	20 km/h
SUBIDA CUESTA	25 km/h
BAJADA CUESTA	40 km/h
CAMBIO DE SENTIDO	10 km/h

Tabla 7: Tiempos de aceleración y frenada considerados Circuito 2

TIEMPOS DE ACELERACIÓN / FRENADA	
ACELERACIÓN	
DE 10 km/h A 25 km/h	5 s
DE 20 km/h A 25 km/h	3 s
DE 10 km/h A 40 km/h	10 s
FRENADA	
DE 25 km/h A 20 km/h	1 s
DE 25 km/h A 10 km/h	1 s
DE 40 km/h A 20 km/h	2 s

La gráfica Velocidad – Tiempo obtenida es la siguiente:

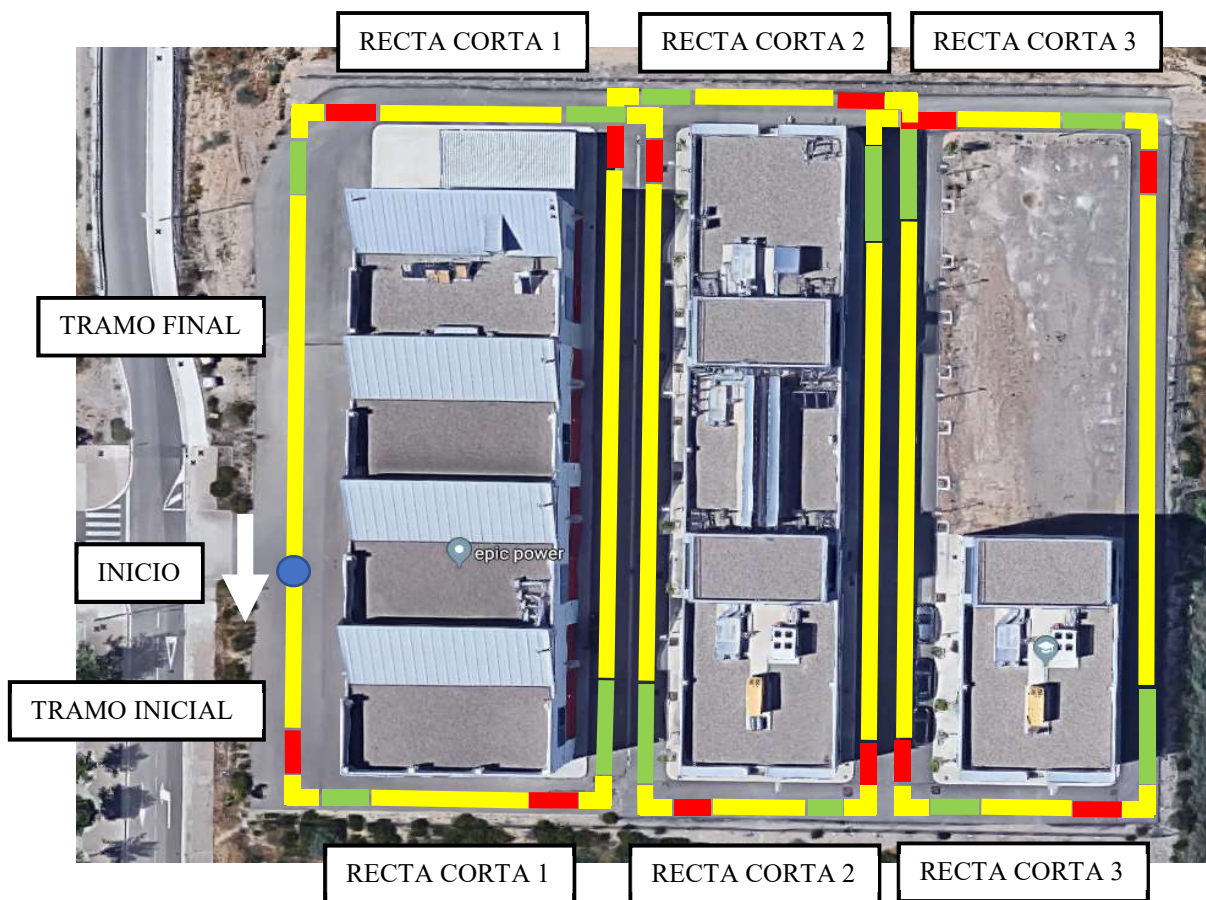


Gráfica 3: Velocidad teórica Circuito 2

El tiempo teórico que se tarda en completar una vuelta al circuito es aproximadamente 72 segundos. Se puede apreciar claramente que la velocidad a la hora de subir la cuesta es considerablemente menor a cuando se desciende, momento en el que el vehículo alcanza una velocidad teórica máxima de 40 km/h. Además, se pueden observar las frenadas correspondientes a la curva y a los cambios de sentido.

- **Circuito 3: Trayecto con curvas**

El tercer circuito realizado trata de simular un escenario urbano. Se trata del circuito de mayor espacio recorrido y con mayor número de curvas, lo que implica que el vehículo se encuentra acelerando y frenando continuamente.



*Ilustración 17: Circuito 3, trayecto con curvas*

Tabla 8: Características Circuito 3

CARACTERÍSTICAS DEL CIRCUITO	
LONGITUD TOTAL RECORRIDO	620 m
LONGITUD TRAMO INICIAL	25 m
LONGITUD RECTA LARGA	75 m
LONGITUD RECTA CORTA 1	33 m
LONGITUD RECTA CORTA 2	27 m
LONGITUD RECTA CORTA 3	25 m
TRAMO FINAL	50 m
DESNIVEL	0 m
NÚMERO DE CURVAS	12

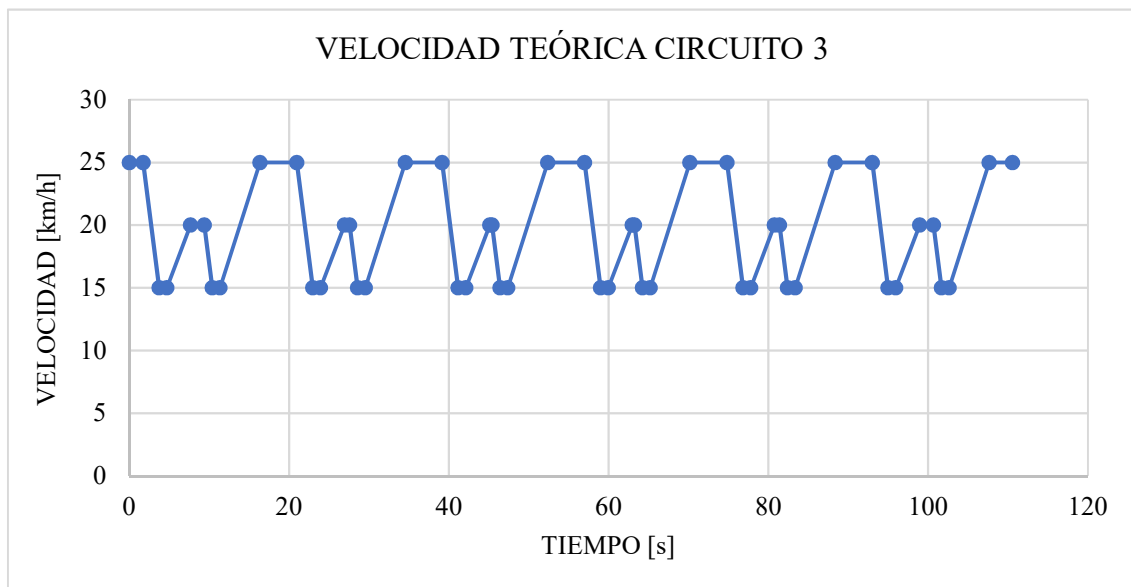
Tabla 9: Velocidades consideradas Circuito 3

VELOCIDADES	
RECTA LARGA	25km/h
RECTA CORTA	20 km/h
CURVA	25 km/h

Tabla 10: Tiempos de aceleración y frenada considerados Circuito 3

TIEMPO DE ACELERACIÓN / FRENADA	
ACELERACIÓN	
DE 15 km/h A 20 km/h	3 s
DE 15 km/h A 25 km/h	5 s
FRENADA	
DE 20 km/h A 15 km/h	1 s
DE 25 km/h A 15 km/h	2 s

La gráfica Velocidad – Tiempo obtenida para este circuito se muestra a continuación:



Gráfica 4: Velocidad teórica Circuito 3

La realización de una vuelta completa tiene una duración teórica aproximada de 110 segundos. Se puede observar que la velocidad varía constantemente debido a la gran cantidad de curvas. Esto da lugar a que el vehículo no pueda alcanzar altas velocidades y que esté continuamente decelerando en la entrada a las curvas, y acelerando una vez comienza la nueva recta.

El comportamiento del vehículo obtenido para los tres circuitos, será posteriormente comparado con los resultados de las pruebas reales. De esta manera, se podrá observar la diferencia entre el comportamiento que en principio se espera del vehículo, y el que realmente tiene lugar.

## 3.2. Análisis teórico energético

De forma teórica, se ha calculado la potencia y la energía consumida por el Zylog a la hora de realizar los ensayos en los diferentes circuitos.

El procedimiento seguido se describe a continuación.

En primer lugar, se realizó un cálculo de la resistencia total al avance. Esta resistencia es la suma de tres componentes:

1. Resistencia de rodadura
2. Resistencia aerodinámica
3. Resistencia a superación de pendientes

### 1) Resistencia a la rodadura

Esta resistencia se debe a la rodadura y se produce por la deformación del neumático. La rueda se aplasta y se deforma dando lugar a un consumo de energía en forma de calor. Una menor resistencia de rodadura implica un menor consumo ya que el vehículo necesitará menos energía para moverse. La resistencia a la rodadura la podemos calcular como:

$$R_r [kg] = \mu * P$$

Siendo:

- $\mu$ : Coeficiente de rodadura
- P: Peso del vehículo en kg

Esta formulación no tiene en cuenta la deformación lateral del neumático, por lo que pese a que en las curvas esta resistencia es mayor, a nivel de cálculo teórico se analizará como si se tratara de recorridos rectilíneos.



La superficie de todos los circuitos en los que se realizan las pruebas prácticas es asfalto. El coeficiente de rodadura considerado para asfalto en buen estado ha sido  $\mu = 0.03$ .

El peso del vehículo depende de si está cargado o no. Tras tarar el vehículo, se midió que el Zylog tiene un peso de 824 kg. Por otro lado, la carga con la que se cargará el vehículo será de 250 kg. De este modo:

Peso en vacío:

$$P_{vacío} = P_{Zylog} + P_{conductor} = 824 + 66 = 890 \text{ kg}$$

Peso con el vehículo cargado:

$$P_{carga} = P_{vacío} + P_{carga} = P_{Zylog} + P_{conductor} + P_{carga} \Rightarrow$$

$$P_{carga} = 824 + 66 + 250 = 1140 \text{ kg.}$$



*Ilustración 18: Proceso de tara Zylog*

RUEDA 1	144 kg
RUEDA 2	164 kg
BRUTO	308 kg
TARA	0 kg
NETO	308 kg
12/06/19 11:36:13	
RUEDA 1	262 kg
RUEDA 2	254 kg
BRUTO	516 kg
TARA	0 kg
NETO	516 kg
12/06/19 11:37:28	

*Ilustración 19:  
Resultados tara Zylog*

## 2) Resistencia aerodinámica

Se debe al rozamiento que tiene lugar con el aire al circular con el vehículo. Para aire en condiciones normales, la forma de calcular esta resistencia es la siguiente:

$$R_a [kg] = \frac{1}{16} * C_x * S * v^2$$

Siendo:

- $C_x$ : Coeficiente aerodinámico
- S: Superficie frontal del vehículo en  $m^2$
- v: Velocidad en m/s

Para el Zylog se ha considerado un coeficiente aerodinámico  $C_x = 0.3$ . Respecto a la superficie frontal del vehículo, tras realizar las correspondientes mediciones se observó que el vehículo tiene 1.3 m de anchura y 1.75 m de altura aproximadamente, por lo que la superficie frontal tiene un valor de:

$$S [m^2] = \text{Altura} [m] * \text{Anchura} [m] = 1.3 * 1.75 = 2.275 m^2$$

Finalmente, el valor de la velocidad dependerá del tramo del circuito en el que se calcule la fuerza aerodinámica.

### 3) Resistencia a la pendiente

Esta resistencia se debe a la fuerza que aparece por acción de la gravedad cuando se recorre una pendiente, sea esta positiva o negativa. Podemos calcularla por medio de la siguiente ecuación:

$$R_p [kg] = P * \text{sen}(\alpha)$$

Siendo:

- P: Peso del vehículo en kg
- $\alpha$ : Ángulo que forma la pendiente

Como ya se ha comentado anteriormente, el peso del vehículo en vacío es de  $P_{vacío} = 890$  kg, y en carga es de  $P_{carga} = 1140$  kg.

Por otro lado, el valor de la pendiente dependerá del desnivel del circuito, del tramo que se esté recorriendo y de la dirección en la que se esté considerando el movimiento.

De este modo, la suma de estas tres componentes da lugar a la resistencia total al avance.

$$RT = R_r + R_a + R_p$$

Todas las resistencias al avance mencionadas se han calculado en kg, por lo que es necesario multiplicar por la gravedad para pasar a Newtons y trabajar en las unidades del Sistema Internacional.

Los diferentes circuitos en los que se han realizado las prácticas reales, se han dividido en tramos, y en cada uno de ellos se han calculado las tres componentes de la resistencia total al avance. Los tramos considerados para el dimensionamiento energético son los mismos que los planteados para el cálculo cinemático.

Para el cálculo de la potencia mecánica, se ha tenido en cuenta el rendimiento de la transmisión y el del motor eléctrico, considerándolos  $\eta_t = 90 \%$  y  $\eta_e = 95 \%$  respectivamente. De este modo, si en cada tramo considerado multiplicamos la resistencia total al avance por la velocidad media y se divide entre el rendimiento total  $\eta_T = \eta_t * \eta_e$ , obtenemos la potencia necesaria por tramo. Esto nos permite graficar respecto al tiempo la potencia requerida en cada uno de los tramos y ver las necesidades del vehículo durante el circuito.

Para el cálculo de la energía o consumo del vehículo, se calcula el área bajo la curva Potencia – Tiempo hallada anteriormente. Esta energía puede tener un valor positivo, o negativo en caso de transformación de energía en energía cinética. De este modo, por un lado se calcula el área bajo la curva cuando la potencia es positiva, y por otro cuando es negativa. Así se obtiene la energía consumida y la que podría ser regenerada respectivamente, pudiendo hacer un balance de ambas.

Cabe destacar que los análisis teóricos únicamente serán capaces de mostrar capacidad de regeneración en aquellos casos en los que la resistencia a la pendiente sea lo suficientemente negativa, como para vencer el valor de la resistencia de rodadura más la aerodinámica. Esto implica que en estos cálculos teóricos únicamente observaremos capacidad de regeneración en aquellos tramos en los que el vehículo descienda una pendiente lo suficientemente inclinada.

En este caso teórico, como para los cálculos cinemáticos se han calculado las distancias recorridas en cada tramo, también podría calcularse la energía en kJ como la suma de la resistencia total al avance multiplicada por la distancia recorrida en cada tramo. Conociendo la energía en kJ consumida por vuelta, podemos dividirla por el tiempo tomado para dar una vuelta al circuito y obtener la potencia media del circuito. Multiplicando por el tiempo de funcionamiento en horas, obtenemos el consumo de energía del Zylog en KWh.

$$E_{Zylog}[kWh] = \frac{E_{vuelta}[kJ]}{t_{vuelta}[s]} * t_{funcionamiento}[h] = P_{media}[kW] * t_{funcionamiento}[h]$$

Esta es una forma menos exacta de obtener el consumo que calculando el área bajo la curva Potencia – Tiempo, pero nos permite llegar a un resultado similar y poder comparar resultados.

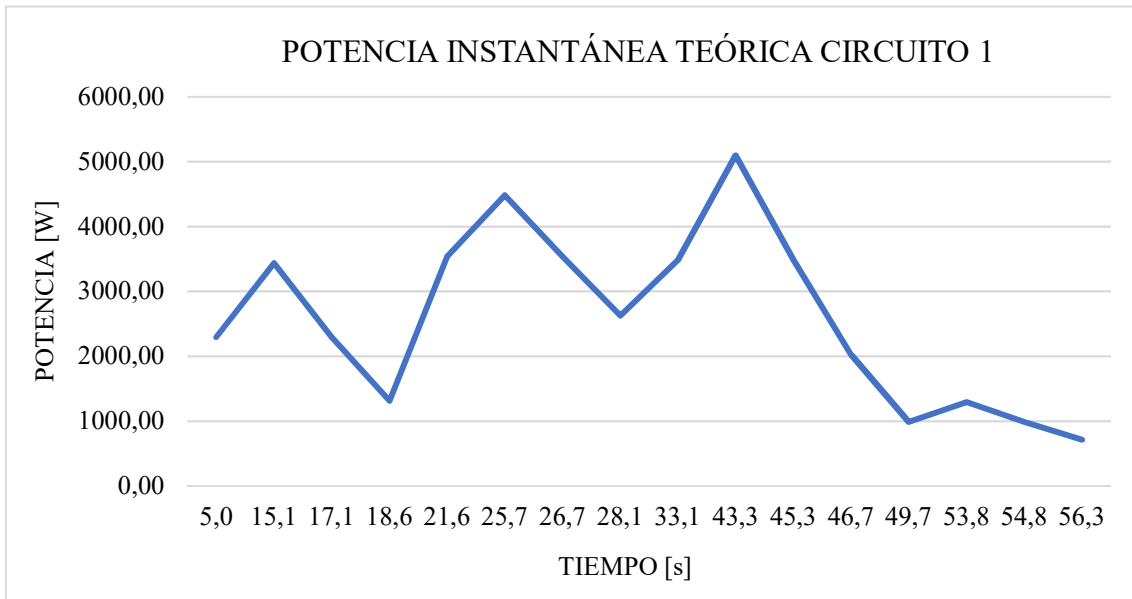
A continuación, se exponen los resultados obtenidos. Se podrá observar cómo es la distribución en el tiempo de la potencia instantánea a lo largo de las vueltas en los diferentes circuitos y se obtendrá un valor teórico de consumo. En primer lugar se analizarán los circuitos con el vehículo en vacío, y posteriormente se comparará con los resultados cuando se transporta carga.

### 3.2.1. Análisis energético de los circuitos con el vehículo en vacío

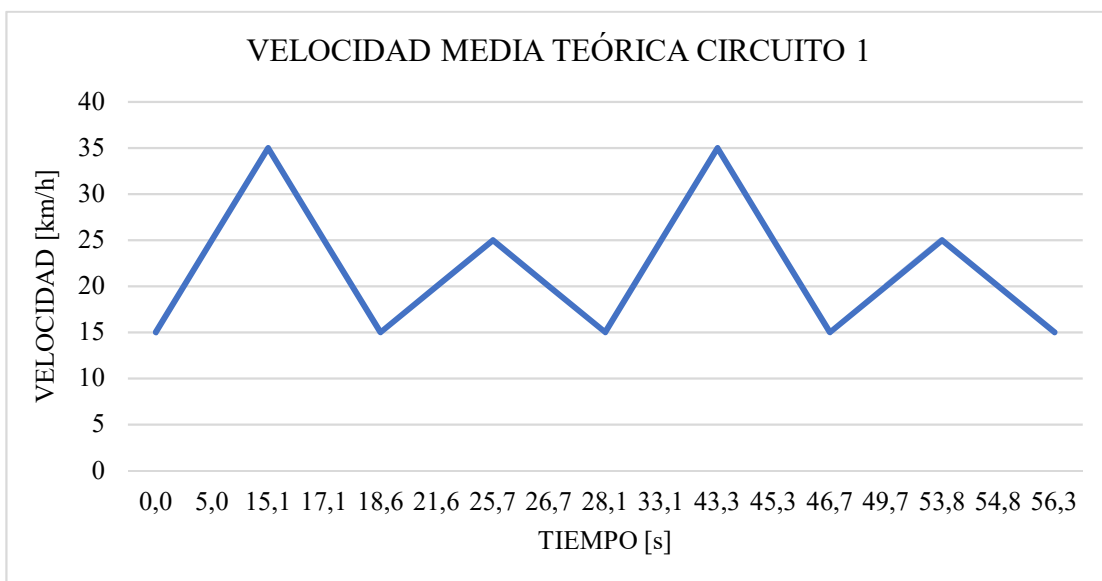
- **Circuito 1: Trayecto en recta**

Tal y como se expone en el Anexo 1: Circuitos, el recorrido está formado por dos rectas largas, dos cortas y cuatro curvas, y el desnivel superado es de 2 m.

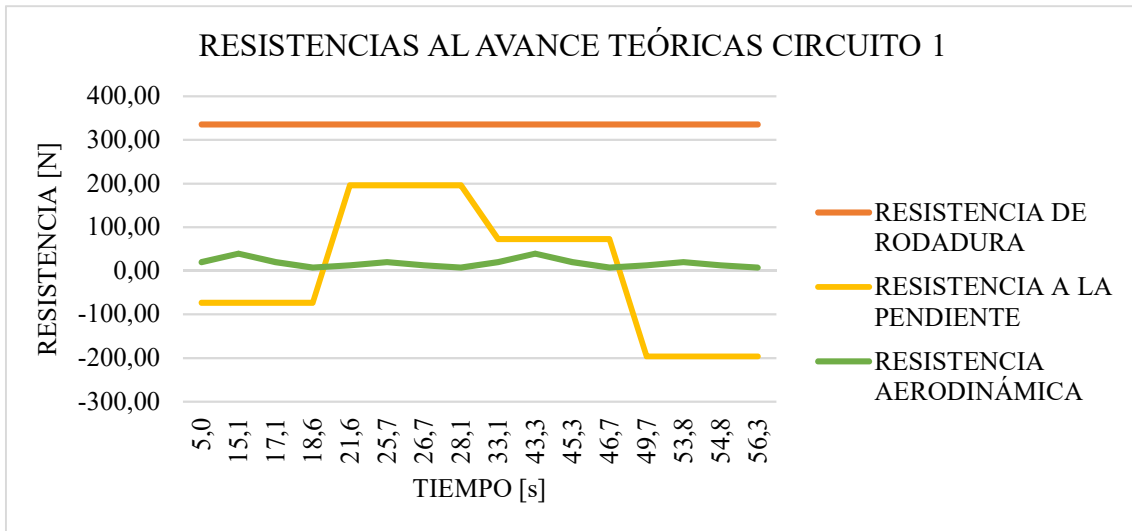
La gráfica que representa la potencia respecto al tiempo en este circuito es la siguiente:



Gráfica 5: Potencia instantánea teórica Circuito 1



Gráfica 6: Velocidad media teórica Circuito 1



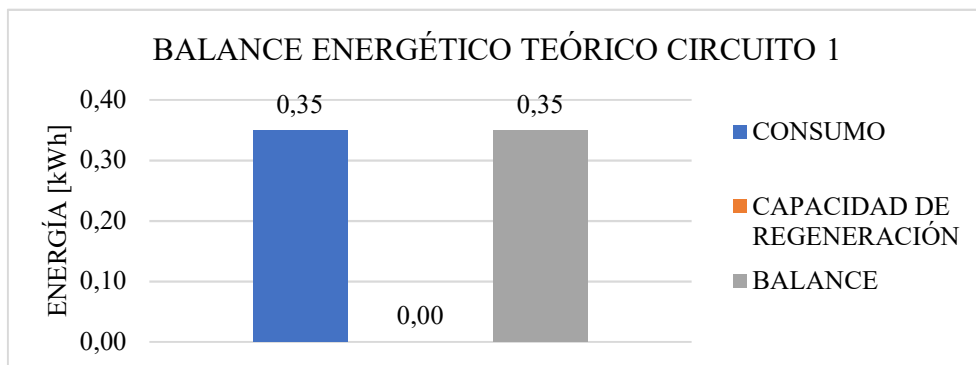
Gráfica 7: Resistencias al avance teóricas Circuito 1

Tal y como se ha descrito durante el procedimiento teórico, el valor de la potencia depende de la resistencia al avance y de la velocidad. Observando la Gráfica 7, vemos que la resistencia de rodadura es prácticamente constante a lo largo de todo el circuito y que la resistencia aerodinámica toma valores muy pequeños. En cambio, la resistencia a la pendiente sí que varía fuertemente pese a que se trata de un desnivel muy pequeño, por lo que tiene mayor influencia.

De los cuatro picos de la Gráfica 5 correspondientes a las cuatro rectas, observamos que las mayores potencias tienen lugar durante la primera recta corta y la segunda recta larga del circuito, tramos en los que la pendiente es positiva y por tanto la fuerza de la gravedad actúa en contra al avance. Pese a que en la recta larga la pendiente a vencer es menor, la velocidad es la máxima del circuito, por lo que la potencia consumida toma un valor superior al de la recta corta.

Por otro lado, en los tramos de pendiente negativa, se puede apreciar que la potencia requerida es claramente menor. Tras las frenadas al final de las rectas podemos ver que la potencia baja bruscamente pero siempre tomando valores positivos.

Respecto a la energía, los resultados obtenidos han sido los siguientes:



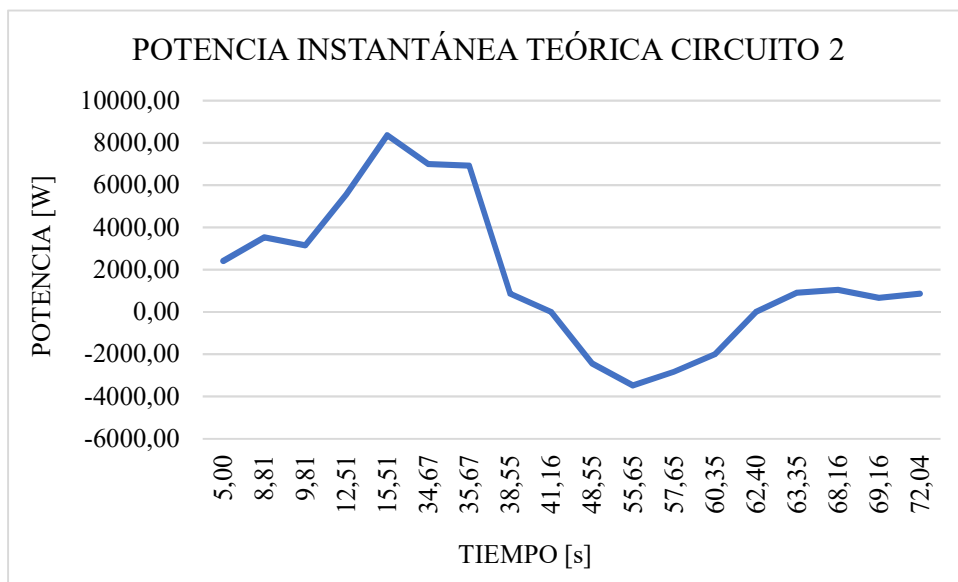
Gráfica 8: Balance energético teórico Circuito 1

Del balance energético, extraemos que el consumo teórico final tras 10 vueltas al parking es de 0.35 kWh. Observamos que no hay posibilidad de regeneración ya que la resistencia a la pendiente en ningún tramo es suficiente como para ser capaz de desplazar el vehículo sin necesidad de la potencia entregada por el motor.

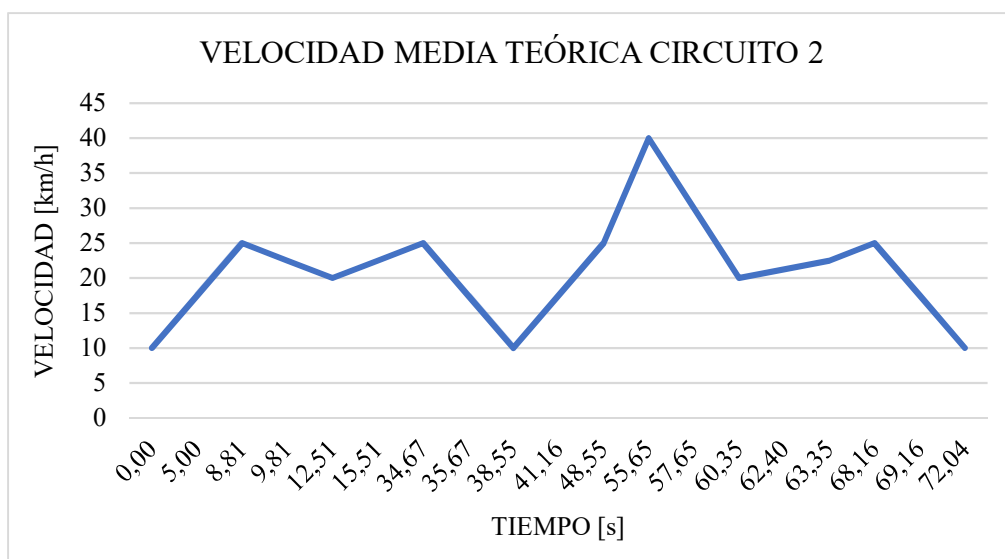
- **Circuito 2: Trayecto en rampa**

Tal y como se describe en el Anexo 1: Circuitos, el segundo recorrido analizado trata de ver el comportamiento del vehículo en cuesta, ya que el circuito consiste básicamente en subir y bajar una pendiente que salva un desnivel considerable.

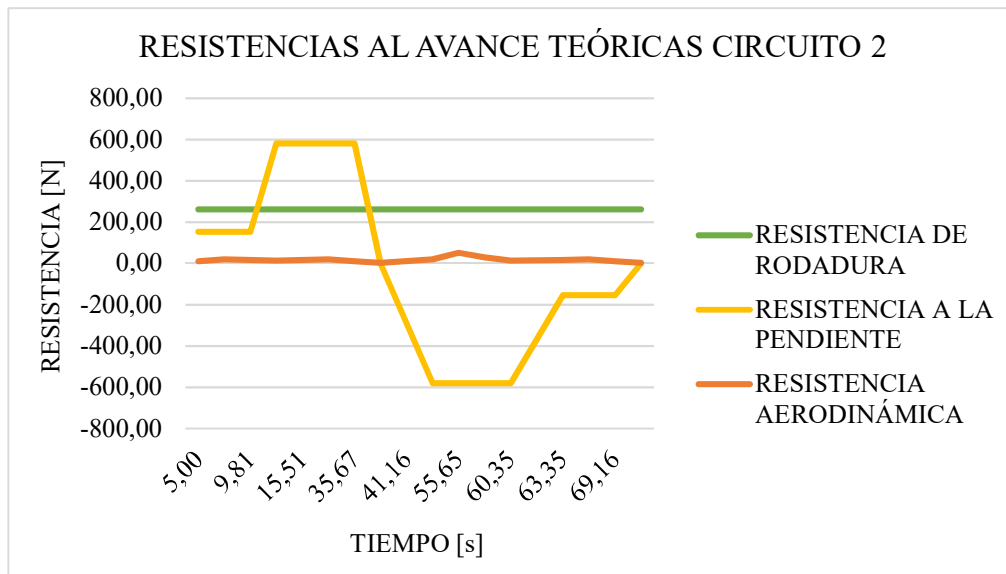
La gráfica Potencia – Tiempo obtenida es al siguiente:



Gráfica 9: Potencia instantánea teórica Circuito 2



Gráfica 10: Velocidad media teórica Circuito 2

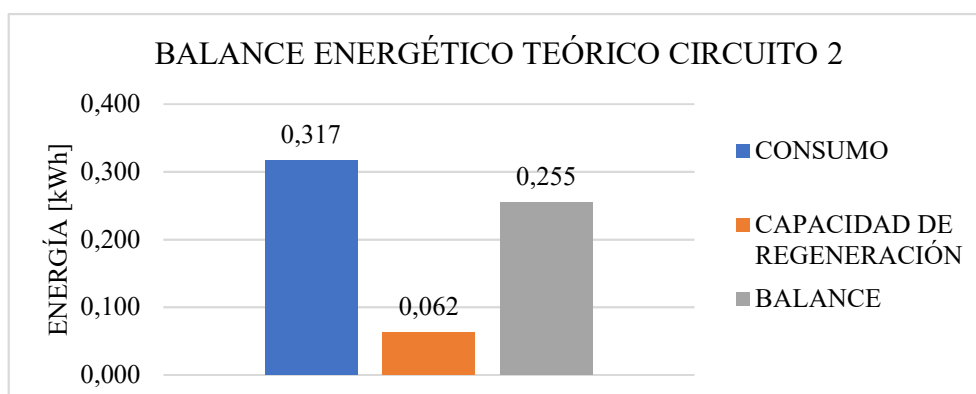


Gráfica 11: Resistencias al avance teóricas Circuito 2

En las Gráfica 9 observamos que la potencia a lo largo del recorrido varía muy considerablemente. Existen instantes durante la subida de la cuesta con una potencia requerida muy elevada, mientras que durante el descenso se alcanzan valores negativos, lo que quiere decir que la fuerza debida a la pendiente es capaz de desplaza el vehículo sin necesidad de potencia por parte del motor.

En este caso, la velocidad proporciona una información que podría crear confusión, ya que en los tramos de mayor velocidad, la potencia instantánea es menor y viceversa. Observando la Gráfica 11, vemos que a pesar de la baja velocidad en el tramo inicial, la resistencia a la pendiente toma valores muy positivos, lo que acaba suponiendo una alta potencia requerida. Por el contrario, en el tramo de mayor velocidad, la resistencia a la pendiente es muy negativa y favorece claramente al avance, por lo que durante el descenso de la cuesta no se requiere potencia, lo que podría dar lugar a una gran regeneración sobre las baterías.

Respecto a los valores de energía, se han obtenido los siguientes resultados:

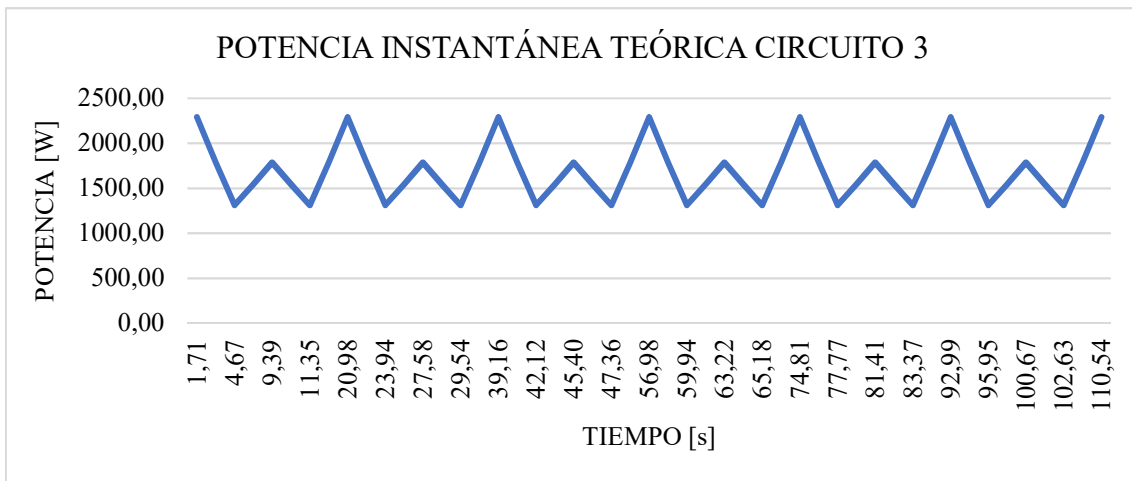


Gráfica 12: Balance energético teórico Circuito 2

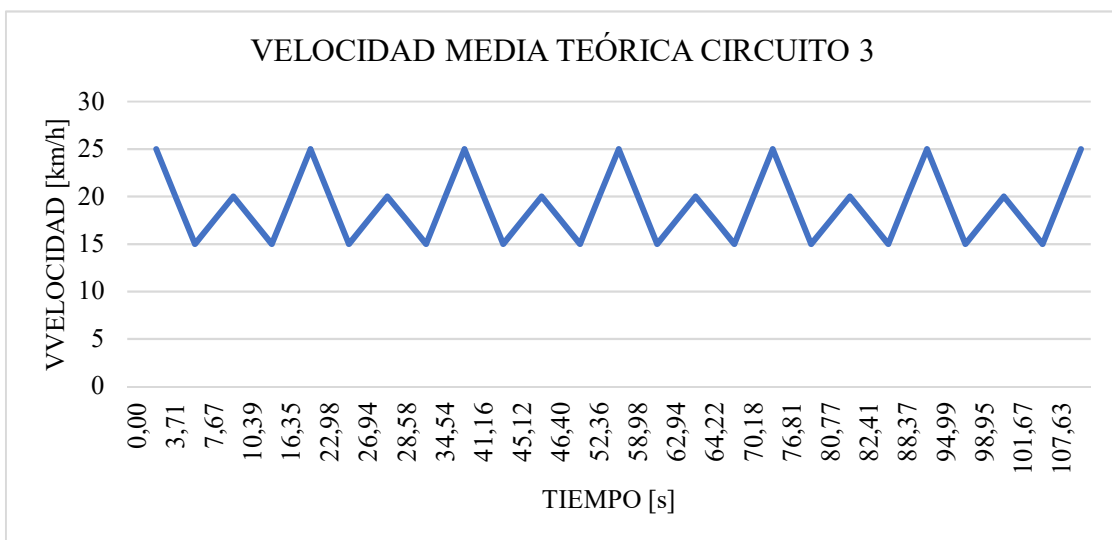
Viendo los resultados, observamos que el consumo es muy alto durante el circuito, pero también lo es la regeneración. Por ello, del balance energético teórico obtenemos que el consumo en el circuito en cuesta toma un valor de 0.255 kWh para las 5 vueltas dadas. En este caso, si que se puede intuir una gran regeneración de las baterías durante la bajada siempre que el motor esté en marcha ya que no es necesaria la potencia del motor en algunos tramos durante el descenso.

- **Circuito 3: Trayecto con curvas**

El último circuito analizado pretende simular un escenario urbano. Se caracteriza por no tener desnivel, pero sí tener un gran número de curvas, lo que hará que el vehículo este constantemente variando su velocidad. Esta es la curva Potencia – Tiempo obtenida.

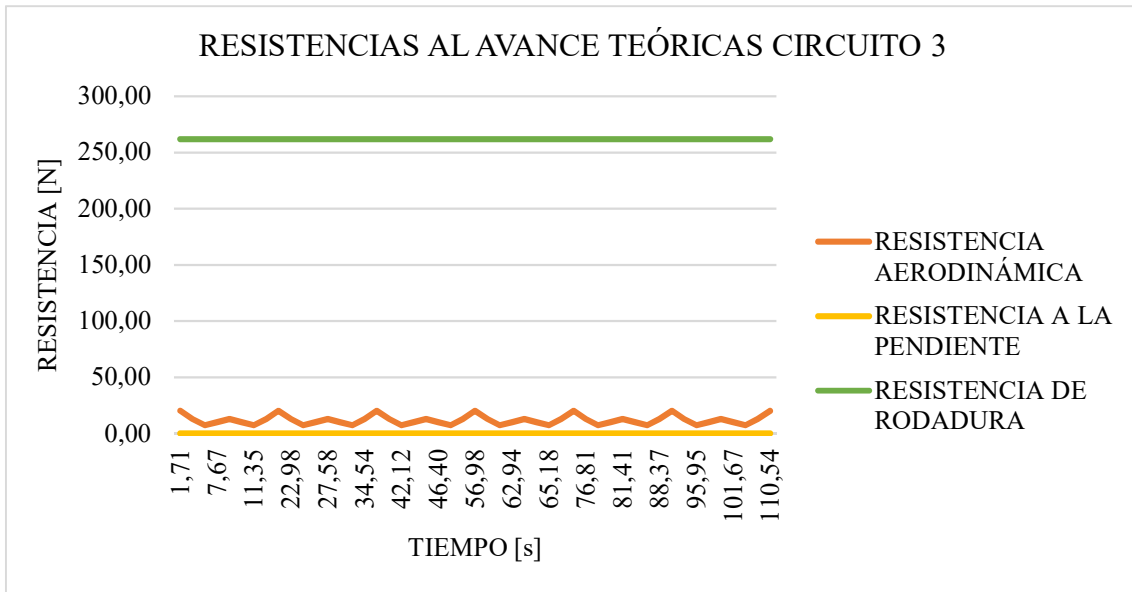


Gráfica 13: Potencia instantánea teórica Circuito 3



Gráfica 14: Velocidad media teórica Circuito 3



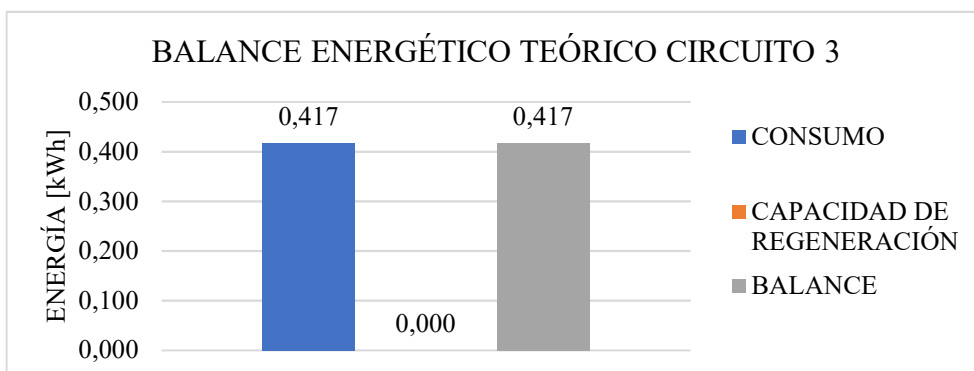


Gráfica 15: Resistencias al avance teóricas Circuito 3

Como era de esperar, la potencia varía con una frecuencia muy alta a lo largo del recorrido. Esto se debe a las continuas curvas del circuito, que hacen que el vehículo esté constantemente frenando y acelerando. La potencia instantánea es mayor en los tramos de recta ya que se alcanzan velocidades más altas, y desciende apreciablemente en los tramos previos a las curvas, ya que dejamos de accionar el pedal del acelerador y por tanto disminuye la velocidad.

Un factor importante a la hora de analizar teóricamente este circuito es la carencia de desnivel, lo que implica que la resistencia a la pendiente sea nula. De este modo, la protagonista es la resistencia a la rodadura. Es importante recordar que la formulación utilizada no tiene en cuenta la deformación lateral del neumático, y dada la cantidad de curvas de este circuito, esta componente realmente tiene un valor considerablemente superior al teórico calculado. Además, el hecho de que no haya pendiente hace que teóricamente siempre se esté demandando potencia mecánica ya que no existe una componente de resistencia que pueda favorecer el avance.

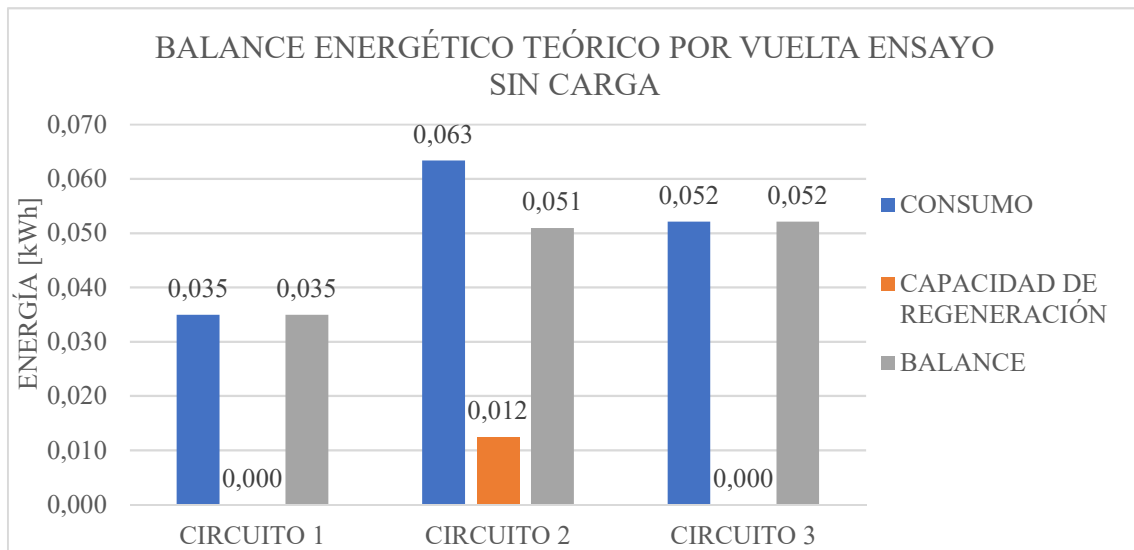
De este modo, el balance de energía en este circuito queda expresado en la siguiente gráfica.



Gráfica 16: Balance energético teórico Circuito 3

Como ya se ha comentado, destaca la ausencia de regeneración de energía en el análisis teórico del circuito. Esto se debe a que, ante la ausencia de resistencia a la pendiente, nos quedamos sin parámetros que con la formulación empleada puedan dar lugar a una posible regeneración energética. De este modo la energía final teórica consumida es de 0.417 kWh en las 8 vueltas realizadas al circuito. Como ya se ha comentado, el no contemplar con la formulación utilizada la resistencia a rodadura lateral, hace que el valor real esperado de consumo sea considerablemente mayor.

Para poder comparar la energía final consumida en los tres circuitos, se puede calcular el consumo por vuelta.



Gráfica 17: Balance energético teórico por vuelta ensayo sin carga

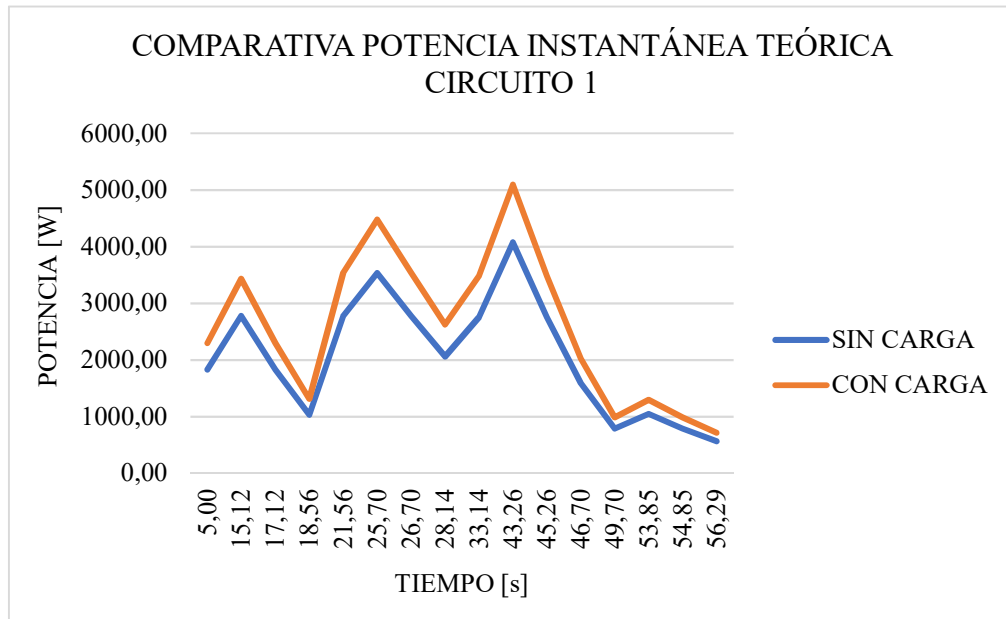
En la Gráfica 17 observamos que pese a que el mayor consumo tiene lugar en el circuito en rampa, el balance final máximo de consumo tiene lugar en el circuito 3. Este se debe a que durante el descenso, hay tramos en los que la propia pendiente es capaz de desplazar el vehículo sin ser necesaria la aportación de potencia por parte del motor. Esto hace que eléctricamente pueda darse una gran regeneración de las baterías.

Dado que cada circuito tiene una duración determinada y un espacio recorrido diferente, para hacer una verdadera comparativa resulta interesante calcular este consumo por kilómetro. De este modo se puede averiguar qué circuito es más duro. Este análisis se llevará a cabo una vez se conozcan los consumos reales del vehículo.

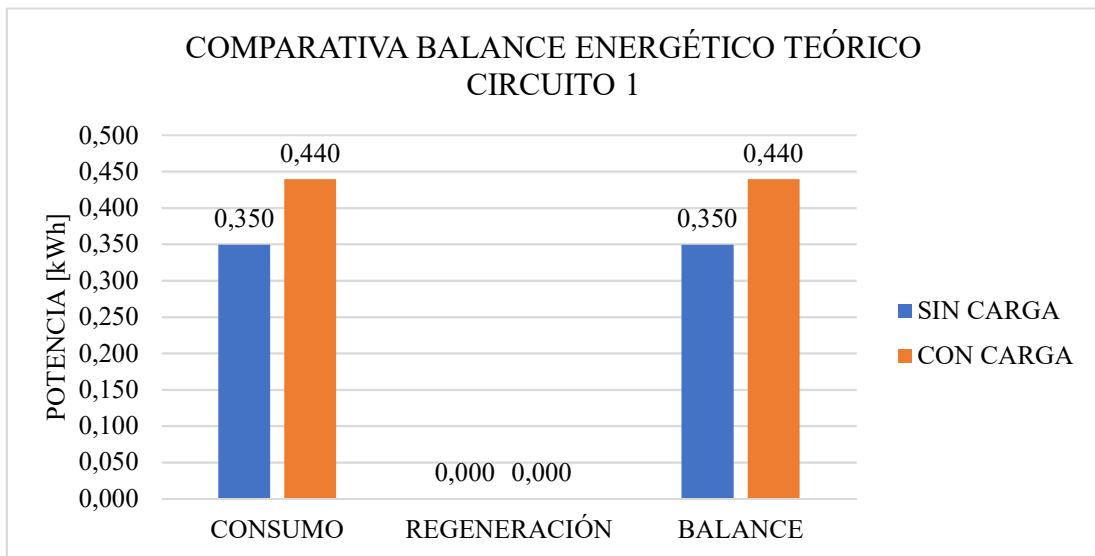
### 3.2.2. Comparativa del análisis energético de los circuitos con el vehículo en vacío y con carga

A continuación, se muestra una comparativa en cada uno de los circuitos de los resultados obtenidos en vacío frente a con el vehículo cargado.

- **Circuito 1: Trayecto en recta**



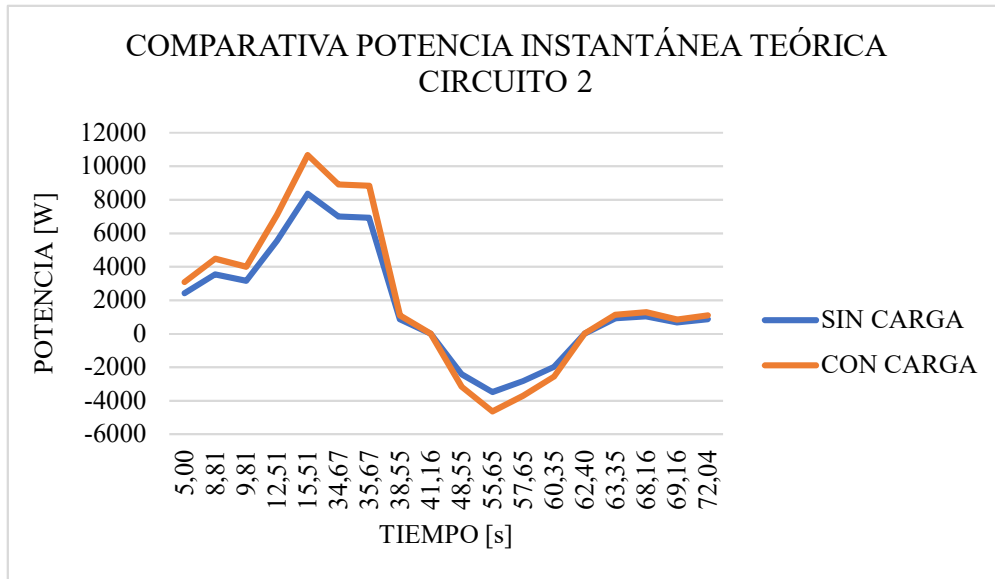
Gráfica 18: Comparativa potencia instantánea teórica Circuito 1



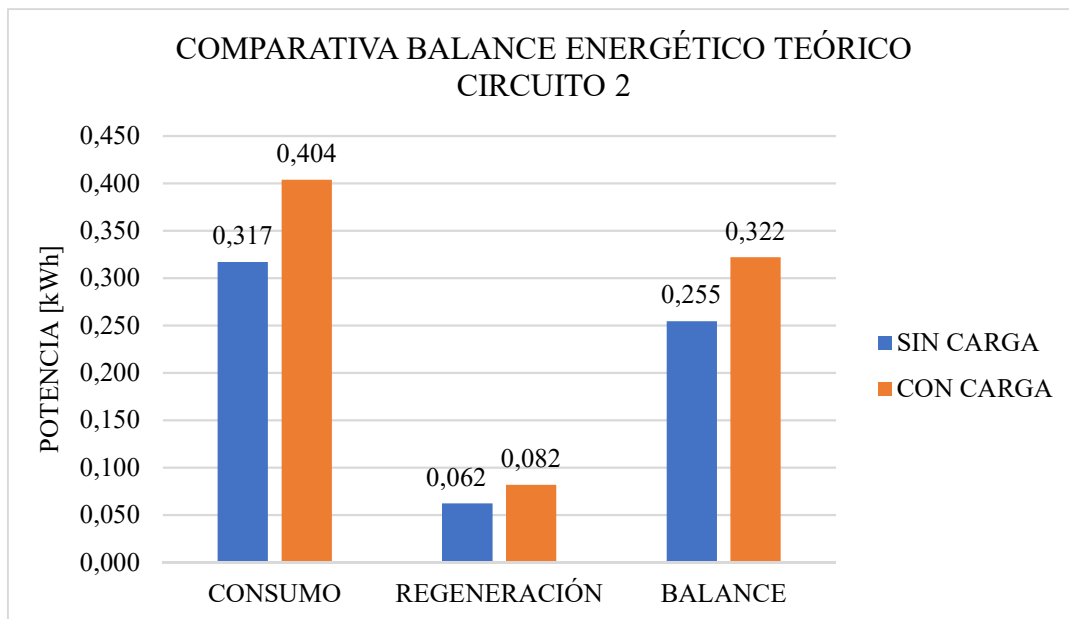
Gráfica 19: Comparativa balance energético teórico Circuito 1

Con el vehículo cargado los picos de demanda de potencia toman valores más altos, cosa coherente ya que al aumentar el peso la resistencia al avance es mayor. Observando la Gráfica 19, vemos que al realizar las 10 vueltas al circuito con el vehículo cargado el consumo aumenta considerablemente, ya que además del peso del conductor hay que arrastrar también el peso de la carga.

- **Circuito 2: Trayecto en rampa**



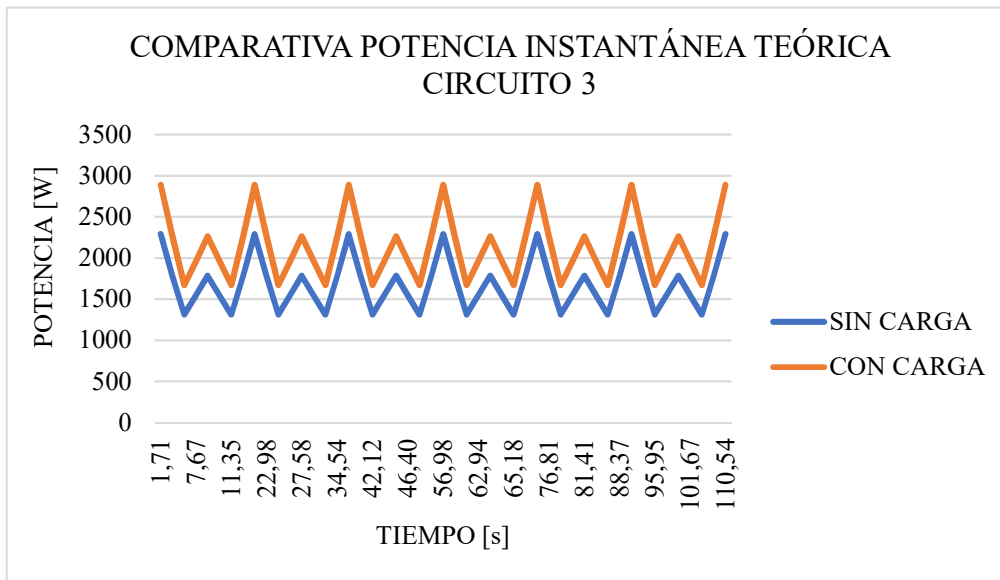
Gráfica 20: Comparativa potencia instantánea teórica Circuito 2



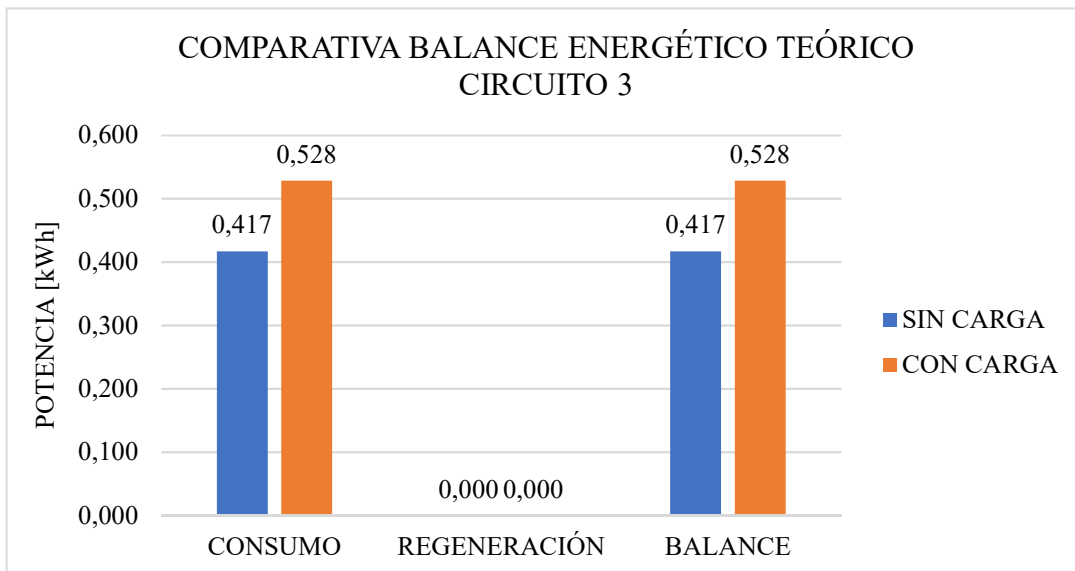
Gráfica 21: Comparativa balance energético teórico Circuito 2

De nuevo podemos observar que al aumentar el peso del vehículo, en los tramos de demanda de energía tanto la potencia como el consumo es mayor. Por otro lado, en el tramo de descenso podemos observar que la pendiente empuja el vehículo con mayor fuerza al ir cargado, lo que implica que la potencia tome valores más negativos y que por tanto la regeneración eléctrica de las baterías también será mayor con el vehículo cargado. Como resultado, al transportar una carga de 250 kg, el consumo total es más alto al cabo de las 5 vueltas realizadas al circuito.

- **Circuito 3: Trayecto con curvas**



Gráfica 22: Comparativa potencia instantánea teórica Circuito 3



Gráfica 23: Comparativa balance energético teórico Circuito 3

Al igual que en el resto de casos, la potencia instantánea y el consumo aumentan al cargar el vehículo. Tal y como se observa en la Gráfica 23, la regeneración de las baterías sigue siendo nula. Como ya se ha comentado anteriormente, con la formulación empleada, el único parámetro que puede favorecer al avance dentro de las resistencias consideradas es la resistencia a la pendiente. Dado que el circuito no tiene desnivel, esta resistencia es nula y por tanto no hay posibilidad de que el vehículo se mueva sin la potencia proporcionada por el motor.

En resumen, en los tres circuitos se ha obtenido como resultado que al aumentar el peso del vehículo por el hecho de transportar una carga, aumenta la potencia consumida y el consumo.

Estos resultados son lógicos puesto que al aumentar la carga, la resistencia tanto de rodadura como a la pendiente toman valores mayores. Esto implica que la resistencia al avance aumente y por tanto sea necesaria una mayor potencia y consumo para el desplazamiento del vehículo. Por el contrario, al aumentar la resistencia a la pendiente también se favorece más el avance del vehículo en tramos de descenso, lo que implica que se pueda dar una mayor regeneración de las baterías.

## **CAPÍTULO 4:**

# **DESARROLLO DE LAS PRUEBAS REALES DE MEDIDA DE AUTONOMÍA Y CONSUMOS**

---

Una vez el Zylog estaba listo para su puesta en marcha, se planificó el desarrollo de las pruebas prácticas.

En primer lugar, se llevaron a cabo las pruebas sin carga. Los tres circuitos se realizaron a la vez, uno detrás de otro siguiendo el orden en el que se habían planteado los cálculos teóricos. El primer circuito fue el trayecto en recta, el segundo el trayecto en rampa, y el tercero trayecto con curvas.

Previamente a la realización del ensayo, se revisó el estado de las baterías y que no hubiese ninguna irregularidad. Para registrar los datos a nivel cinemático, se utilizó la aplicación SportsTracker. Antes de comenzar a realizar el circuito correspondiente, se conectaba vía GPS y de este modo se medía la actividad. También se configuró el Registrador USB-5106 para recabar la información en cuanto a la tensión y corriente de las baterías y se amarró al vehículo de modo que la pantalla de visualización de datos quedara a la vista y no hubiese riesgo de caída del dispositivo.

El ensayo sin carga consistió en lo siguiente:

- Circuito 1, trayecto en recta: 10 vueltas.
- Circuito 2, trayecto en rampa: 5 vueltas, lo que implica 5 subidas y 5 bajadas de la pendiente.
- Circuito 3, trayecto con curvas: 8 vueltas.

En el desarrollo de las pruebas prácticas en vacío, cabe destacar que durante el último circuito el vehículo experimentó un bajón brusco de prestaciones. Esto fue debido posiblemente al agotamiento de las baterías durante la realización de los circuitos anteriores. Una vez finalizado el ensayo, se volvió de nuevo a la nave a aparcar el vehículo. Fue una vez se estaba dentro de la nave cuando se notó cierto olor a sobrecalentamiento procedente del motor/controlador en la parte trasera del Zylog. A raíz de esto, se controló si se volvía a percibir dicho olor en las pruebas posteriores.

Además, debido a la anomalía de los resultados obtenidos en el tercer circuito a causa de la baja tensión de las baterías, se decidió repetir la prueba en vacío para el tercer recorrido esta vez con las baterías cargadas al 100 %.

Tras las pruebas prácticas en vacío, fue necesario cargar el vehículo. Este proceso de carga se llevó a cabo en dos fases debido a que al ser la primera vez que se cargaban las baterías estando montadas en el vehículo por medio del cargador del Zylog, no se sabía

bien la duración del proceso. Se llevó a cabo un primer proceso de carga finalizando la tarde, y se concluyó a la mañana siguiente ya que se quería estar presente en todo momento durante el proceso de carga por si surgía cualquier irregularidad.

Una vez las baterías del vehículo estaban listas, se llevaron a cabo los ensayos con carga. En el cajón trasero del vehículo se introdujeron las antiguas baterías hasta llegar a un peso de 250 Kg.



*Ilustración 20: Cajón de carga Zylog*

Con el vehículo ya cargado y la carga asegurada en el interior del cajón para evitar posibles desplazamientos, se realizaron de nuevo los tres circuitos. Se observó que los neumáticos traseros estaban claramente deformados debido al peso que estaba soportando el eje trasero del Zylog.

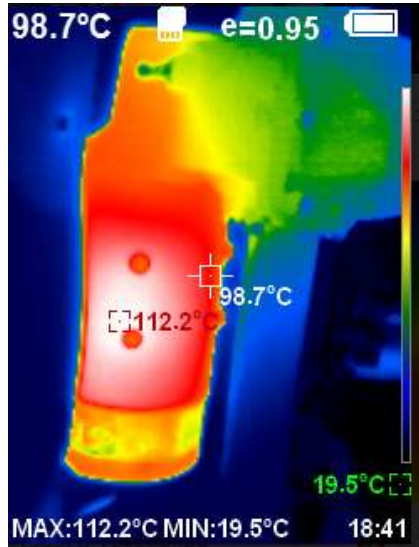


*Ilustración 21: Neumático deformado Zylog cargado*

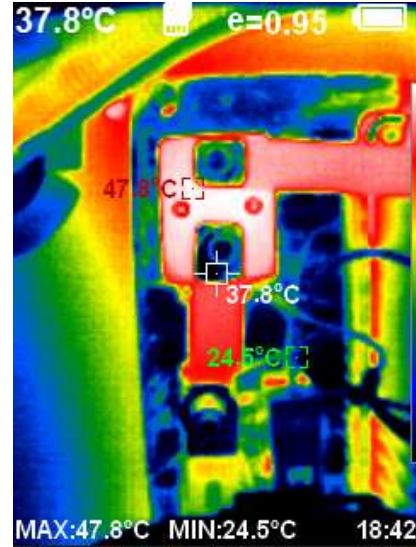
El ensayo realizado fue el exactamente el mismo que con el vehículo en vacío para posteriormente poder comparar los resultados. Se realizaron los tres circuitos de forma seguida con la aplicación SportsTracker registrando los aspectos cinemáticos y el registrador USB-5106 de nuevo midiendo la tensión e intensidad de las baterías.



Una vez finalizados los tres circuitos y llevado el vehículo de vuelta a la nave, se descargó el cajón trasero para no dejar el vehículo con la carga parado durante varios días. Dado que nuevamente apareció cierto olor a quemado, con una cámara térmica se tomaron imágenes de la temperatura del motor y del controlador.



*Ilustración 22:  
Temperatura motor*



*Ilustración 23:  
Temperatura controlador*

Se observó que el motor había alcanzado una temperatura próxima a los 115°, y el controlador cercana a los 45°. La temperatura tan elevada del motor se puede deber a que no consta de aletas de refrigeración y por tanto la evacuación de calor es muy baja.

También se observó que tras las prácticas reales con carga las ruedas habían perdido bastante presión, ya que llegaron a bajar hasta 1.3 bares. Por ello, se decidió hincharlas a una presión de aproximadamente 2.5 bares para la realización de los siguientes ensayos.

De nuevo se puso a cargar el vehículo. Esta vez, como ya se conocía el tiempo aproximado de carga, se inició por la mañana y se completó todo el proceso sin pausas.

Nuevamente con el vehículo cargado, se llevó a cabo la última prueba planificada. Esta trataba de ver el comportamiento del vehículo en un ensayo de larga duración. El ensayo consistió en dar vueltas al circuito 1 durante una hora para ver la evolución de la tensión y tratar de conocer la autonomía del vehículo.

A lo largo de la hora de ensayo, se dieron 67 vueltas al circuito y el Zylog acabó indicando una batería restante del 40%. Durante el transcurso de las vueltas, se realizaron 2 paradas de unos segundos para comprobar si el motor/controlador desprendía el olor a sobrecalentamiento que se había percibido en la realización de los ensayos con y sin carga. Dado que no se percibió olor alguno y no había ningún tipo de irregularidad, el ensayo se continuó hasta el final.



*Ilustración 24: Batería Zylog tras ensayo de agotamiento de baterías*

Con esta prueba, se dieron por terminados los ensayos reales con el Zylog y se pasó a analizar los resultados obtenidos.

## CAPÍTULO 5:

# COMPROBACIÓN DE RESULTADOS Y COMPARATIVA DE MEDIDAS

---

A continuación, se lleva a cabo un análisis de los resultados obtenidos durante los ensayos prácticos. Posteriormente, se compararán los resultados reales con los teóricos realizados inicialmente para ver las diferencias entre el comportamiento previsto teóricamente y el que en realidad se ha registrado.

### 5.1. Análisis cinemático

Como ya se ha comentado durante la descripción del desarrollo de las pruebas reales, para registrar los datos a nivel cinemático se utilizó la aplicación SportsTracker. La aplicación medía vía GPS en cada punto registrado la posición y el tiempo. La posición venía dada según las coordenadas geográficas y la elevación, y el tiempo según la hora del dispositivo, en este caso un móvil. La frecuencia con la que los datos eran registrados no era constante, lo que dificultó su análisis.

Dado que el objetivo del análisis cinemático es observar cómo varía la velocidad respecto al tiempo en los circuitos, se calculó la distancia recorrida entre dos puntos consecutivos. Con esta distancia y conociendo el tiempo transcurrido entre ambos puntos, se calculó la velocidad.

Para el cálculo de la distancia recorrida entre dos puntos geográficos se utilizó la fórmula de Haversine, que nos permite calcular la distancia entre dos puntos de la superficie terrestre conociendo su latitud y longitud. Se trata de una aproximación que para el cálculo considera la superficie terrestre como esférica y no tiene en cuenta la diferencia de elevación entre puntos.

$$d [km] = 6371 * \text{acos} \left( \cos((90 - LAT 1)) * \cos((90 - LAT 2)) + \text{sen}((90 - LAT 1)) * \text{sen}((90 - LAT 2)) * \cos((LONG 1 - LONG 2)) \right)$$

Hay que tener en cuenta que las funciones trigonométricas han de ser calculadas en radianes y que el resultado obtenido es en kilómetros. De este modo, multiplicando el resultado obtenido por mil, obtenemos la distancia en metros entre los puntos calculados.

Conociendo la distancia recorrida entre los puntos registrados y el tiempo transcurrido, podemos conocer la velocidad por medio de la fórmula cinemática:

$$v [m/s] = \frac{d [m]}{t [s]}$$

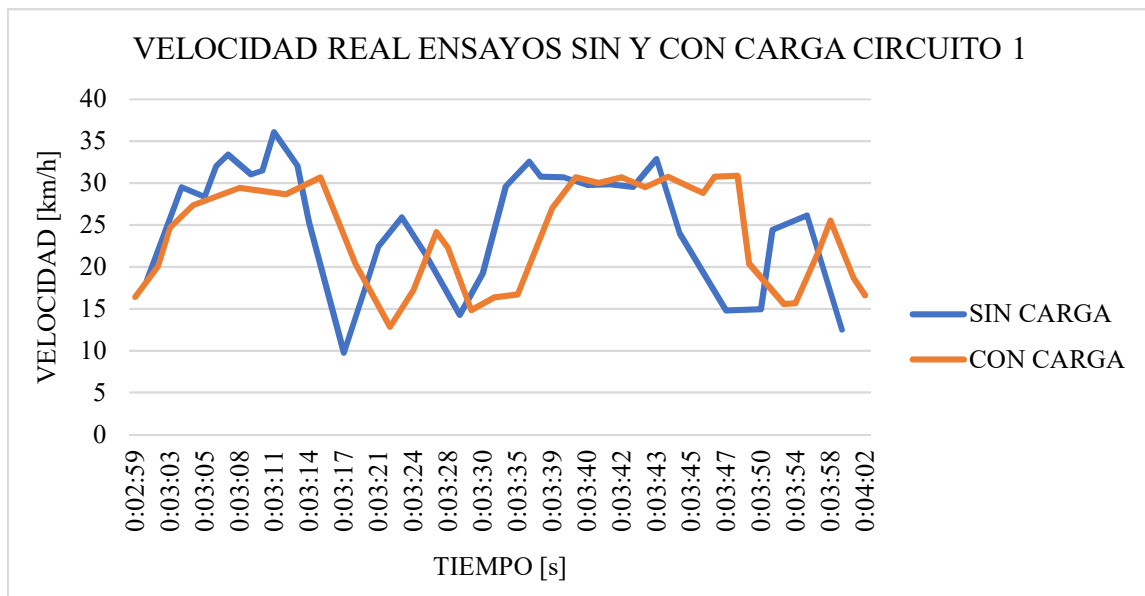
Una vez obtenida la velocidad en los diferentes puntos registrados, se realizó un análisis de los datos para poder visualizar gráficamente los resultados en cada una de las vueltas a los circuitos.

Se llegó a la conclusión de que la frecuencia entre los puntos registrados dependía de la velocidad. En los tramos de mayor velocidad la frecuencia era mucho más alta que en los tramos más lentos. Dado que la aplicación medía el tiempo entre puntos registrados en segundos enteros, sin decimales, a la hora de calcular y graficar la velocidad en algunos puntos aparecían valores aparentemente incoherentes. Una vez detectados y omitidos estos valores, se graficó la distribución de la velocidad en cada una de las vueltas realizadas para cada circuito.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos y se compara el ensayo en vacío y el realizado con carga. Para esta comparativa, no se han seleccionado las primeras vueltas dadas a cada circuito ya que, al ser de toma de contacto, los resultados obtenidos podrían no ser los habituales. Además, las vueltas comparadas se han ajustado temporalmente para que se inicien en el mismo instante de tiempo y poder apreciar las diferencias con mayor facilidad.

### 5.1.1. Resultados cinemáticos en los ensayos reales

- **Circuito 1: Trayecto en recta**

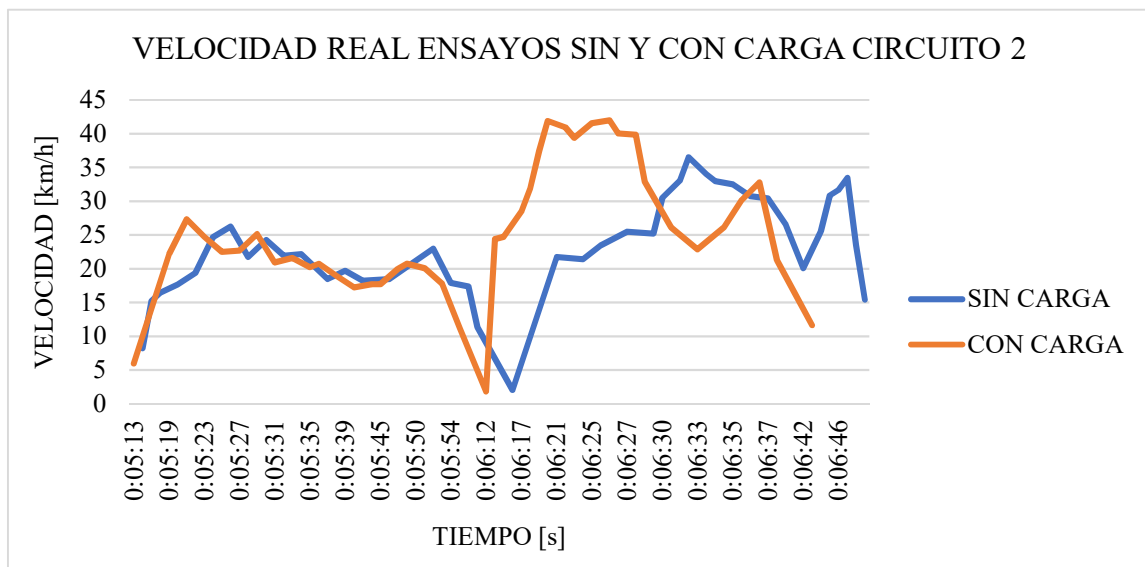


Gráfica 24: Velocidad real ensayos sin y con carga Circuito 1

La diferencia entre el comportamiento cinemático con y sin carga es apreciable principalmente en que el tiempo transcurrido en una vuelta con el Zylog cargado con 250 Kg es aproximadamente 4 segundos mayor. También se puede apreciar que las velocidades máximas sin carga son más elevadas y que los tiempos de aceleración con carga son más largos.

Cabe mencionar que los ensayos con carga se realizaron posteriormente, por lo que ya se tenía cierta experiencia en la conducción del circuito. El hecho de que las pruebas sin carga se realizaran en primer lugar sin experiencia previa, implica que tal vez las velocidades en el circuito podrían haber sido algo mayores.

- **Circuito 2: Trayecto en rampa**

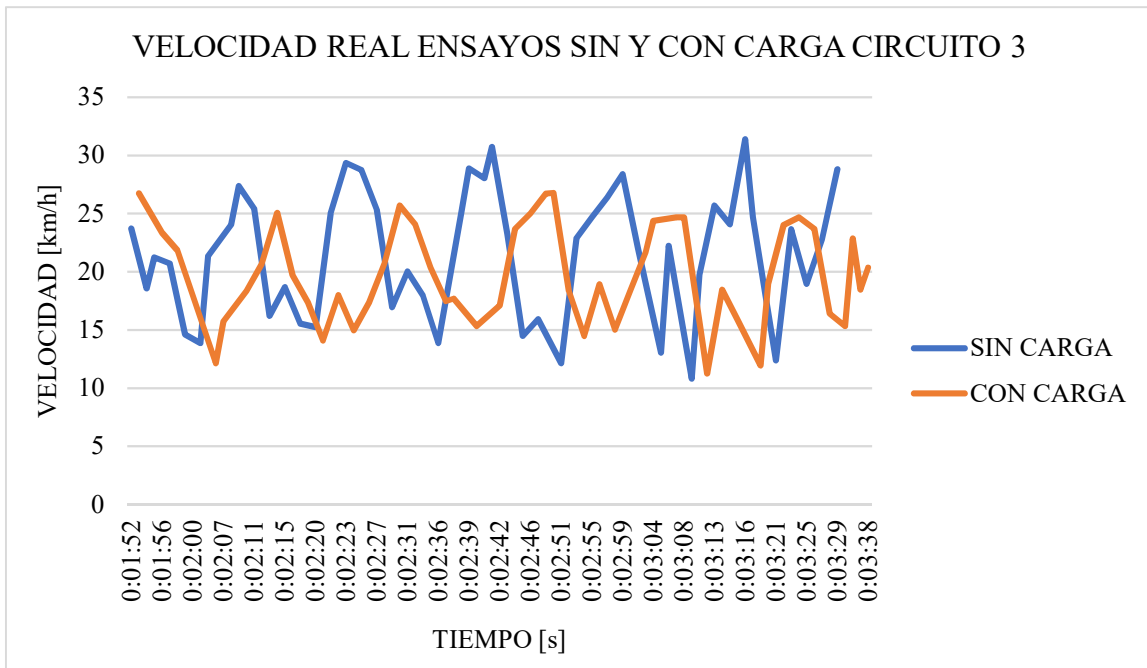


Gráfica 25: Velocidad real ensayos sin y con carga Circuito 2

Observando los resultados podemos ver que el circuito se realizó en menor tiempo con el vehículo cargado que en vacío. El hecho de que el tramo de descenso de la cuesta sea más rápido es coherente debido a que el peso del vehículo es mayor. Por otro lado, es de extrañar que el tramo de ascenso también se haya realizado en menor tiempo con el vehículo cargado. Esto se debe a que, habiendo realizado previamente las pruebas en vacío, se tenía constancia de que había que alcanzar la máxima velocidad posible en el tramo llano antes de la rampa para afrontar mejor la pendiente. Esto queda puesto de manifiesto en el primer máximo relativo de la gráfica con carga.

La velocidad en ambos ensayos disminuye paulatinamente con valores similares conforme subimos la cuesta. En cambio, se puede apreciar que la aceleración y la velocidad de descenso con el vehículo cargado es considerablemente mayor. Con el Zylog cargado, alcanzamos una velocidad máxima durante el descenso de 42 km/h.

- **Circuito 3: Trayecto con curvas**



Gráfica 26: Velocidad real ensayos sin y con carga Circuito 3

Observamos que las velocidades son más elevadas durante la prueba en vacío alcanzando velocidades en torno a los 30 km/h en las rectas más largas, frente a los 25 km/h con el vehículo cargado. También se puede ver que en los tramos de aceleración con carga, la velocidad no aumenta tan bruscamente como con el Zylog sin carga.

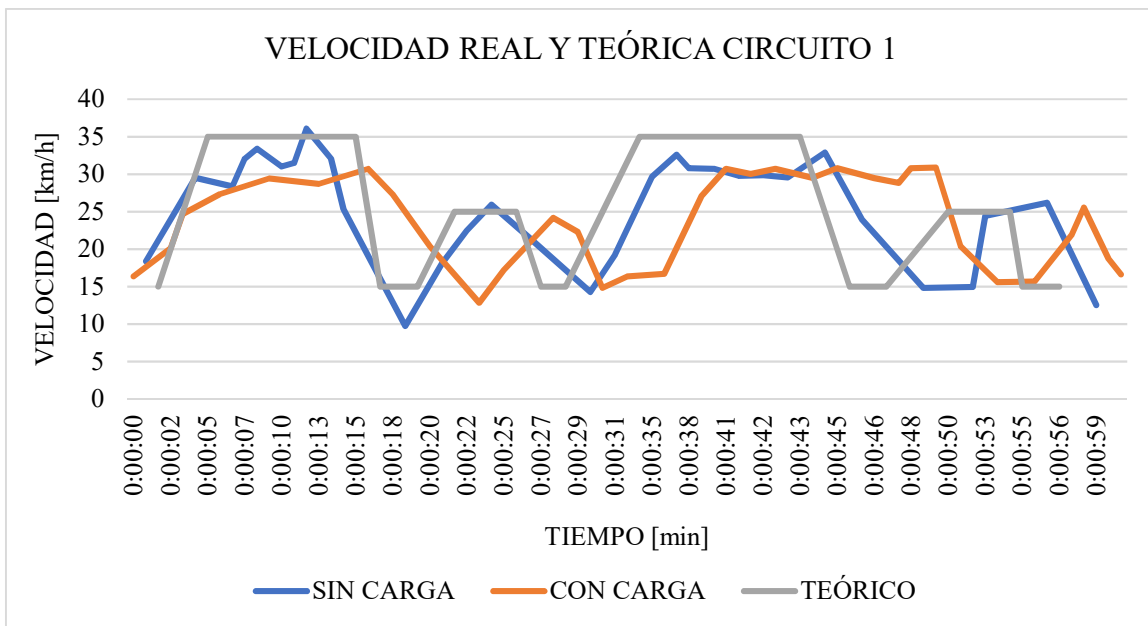
Además, se puede apreciar como las curvas comparadas se descomparan conforme transcurre la vuelta debido a que el circuito se recorre en menos tiempo yendo con el vehículo en vacío. Siendo más concretos, existen unos 8 segundos de diferencia por vuelta entre recorrer el circuito en vacío o con un lastre de 250 kg.

### 5.1.2. Comparativa entre resultados reales y teóricos.

Una vez realizados los cálculos cinemáticos a nivel teórico y observados los resultados de las pruebas reales, resulta interesante llevar a cabo una comparativa entre ellos para ver las similitudes y diferencias.

Para los cálculos teóricos únicamente se estimó un perfil de velocidades, fuese el vehículo con carga o en vacío. En las siguientes gráficas, se comparará dicho perfil de velocidades teórico con la distribución de velocidades reales obtenida a lo largo de los circuitos.

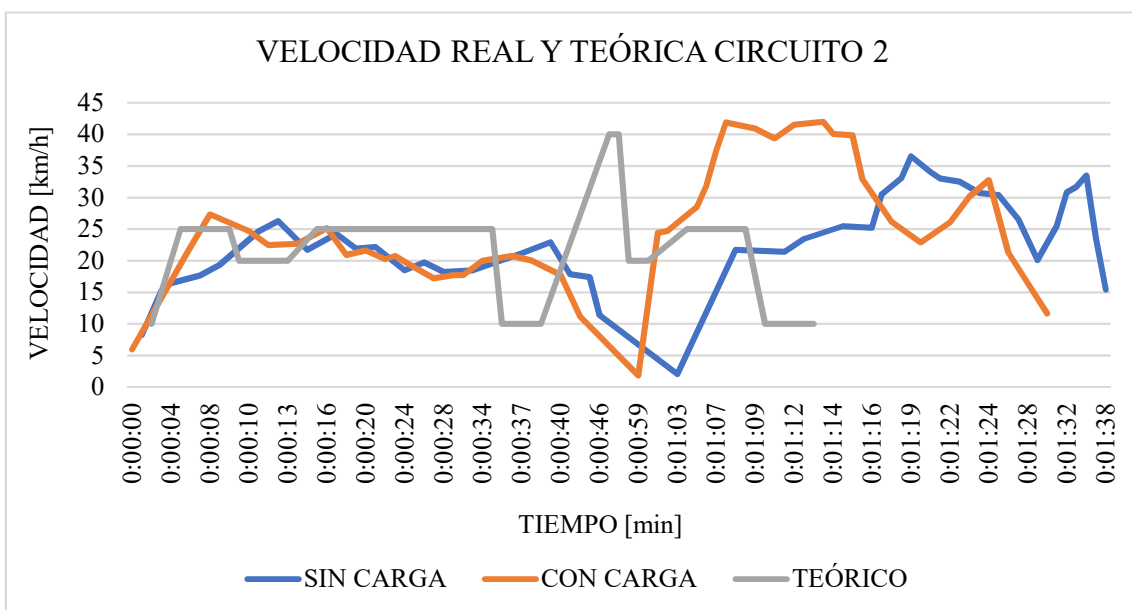
- **Circuito 1: Trayecto en recta**



Gráfica 27: Velocidad real y teórica Circuito 1

El perfil teórico se ajusta en gran medida a los resultados reales obtenidos, siendo el tiempo real en dar una vuelta al circuito con y sin carga unos segundos mayor al teórico. Observamos que en las prácticas reales es difícil mantener una velocidad constante tal y como se ha estimado teóricamente, ya que la mínima presión de más o de menos sobre el pedal del acelerador hace variar la velocidad notablemente. Además, se puede apreciar que las frenadas o deceleraciones reales no son tan bruscas como se había estimado.

- **Circuito 2: Trayecto en rampa**

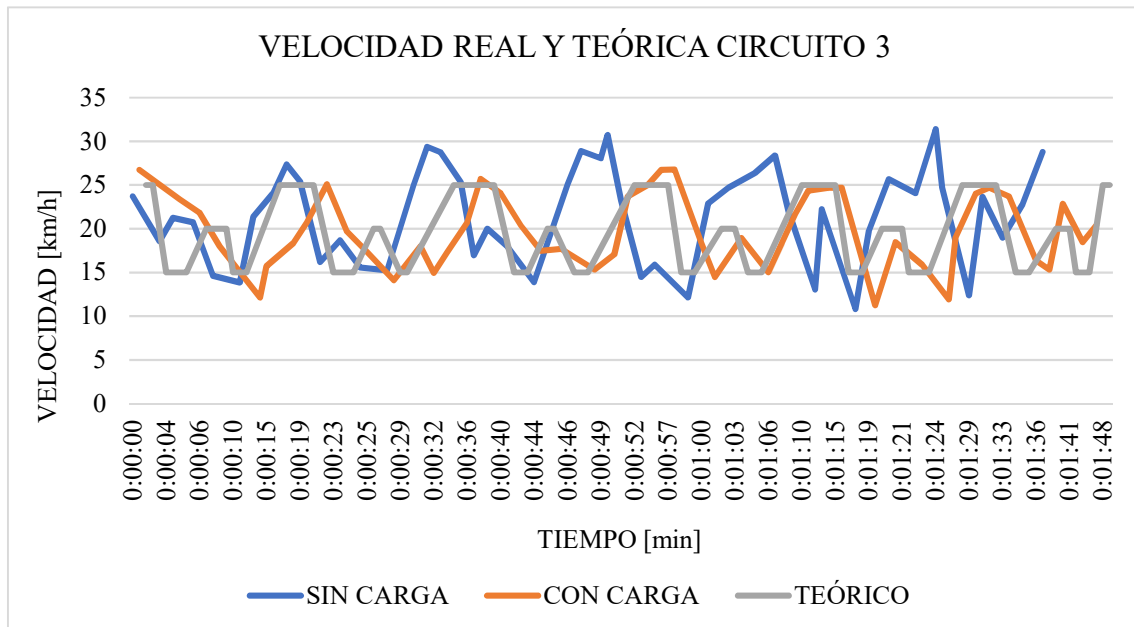


Gráfica 28: Velocidad real y teórica Circuito 2

En este caso, los tiempos reales en recorrer el circuito son claramente más altos que los teóricos, superándolo en hasta alrededor de 25 segundos en la prueba en vacío. Esto se debe principalmente a que en el cambio de sentido una vez ascendida la pendiente, la falta de anchura del circuito requería hacer maniobra y tomó mucho más tiempo del esperado, cosa que no había sido tomada en cuenta en los cálculos teóricos.

Además, la velocidad a lo largo de la subida que se había considerado constante, realmente ha ido disminuyendo a lo largo del ascenso hasta llegar a valores apreciablemente por debajo de los teóricos. Finalmente, la aceleración en la bajada no fue tan alta como se esperaba, aunque la velocidad estimada en el descenso sí que fue acertada.

- **Circuito 3: Trayecto con curvas**



Gráfica 29: Velocidad real y teórica Circuito 3

Finalmente, en el tercer circuito la velocidad real en los ensayos con y sin carga sí que es similar al perfil de velocidades planteado teóricamente. Las velocidades en el ensayo con carga y las teóricas toman valores similares y el tiempo en recorrer el circuito apenas difiere en 5 segundos. En cambio, observamos que en el ensayo en vacío las velocidades alcanzadas son superiores a las teóricas y el tiempo en recorrer el circuito es algo inferior.



## **5.2. Análisis energético**

Respecto al análisis energético, los datos fueron recabados y almacenados por el registrador USB-5106. Se midieron los datos tanto de tensión entre bornes de las baterías como de intensidad de entrada/salida de las mismas.

Para medir la tensión se conectó el dispositivo en paralelo a los bornes de las baterías, y por medio de una sonda se llevó a cabo el divisor de tensión necesario para adecuar dicha tensión a la de entrada del registrador, que era de 2.5 V.

Para medir la corriente de entrada a las baterías se utilizó un sensor Hall, cuyo funcionamiento se explica en el Anexo 2: Aparatos y dispositivos. Se hizo pasar el conector del borne positivo de la batería 8 por el toroide tal y como se muestra en la Ilustración 13. Este sensor se caracteriza por dar una tensión correspondiente a la intensidad que circula. Conociendo la tensión y las propiedades del sensor definidas en su correspondiente hoja de características, podemos saber la intensidad de entrada a las baterías.

De este modo, con el sensor montado en el cajón de las baterías del Zylog, y el registrador conectado tanto a los bornes de las baterías como al sensor, se realizaron los diferentes circuitos y se llevaron a cabo los procesos de carga de las baterías del vehículo.

Una vez había terminado el ensayo o proceso que se quería medir, se esperaba unos minutos para que se estabilizasen los valores de tensión e intensidad de las baterías y se desmontaba el registrador del vehículo. Para poder visualizar y trabajar con los resultados obtenidos, se conectaba el dispositivo al ordenador y se volcaban los datos registrados.

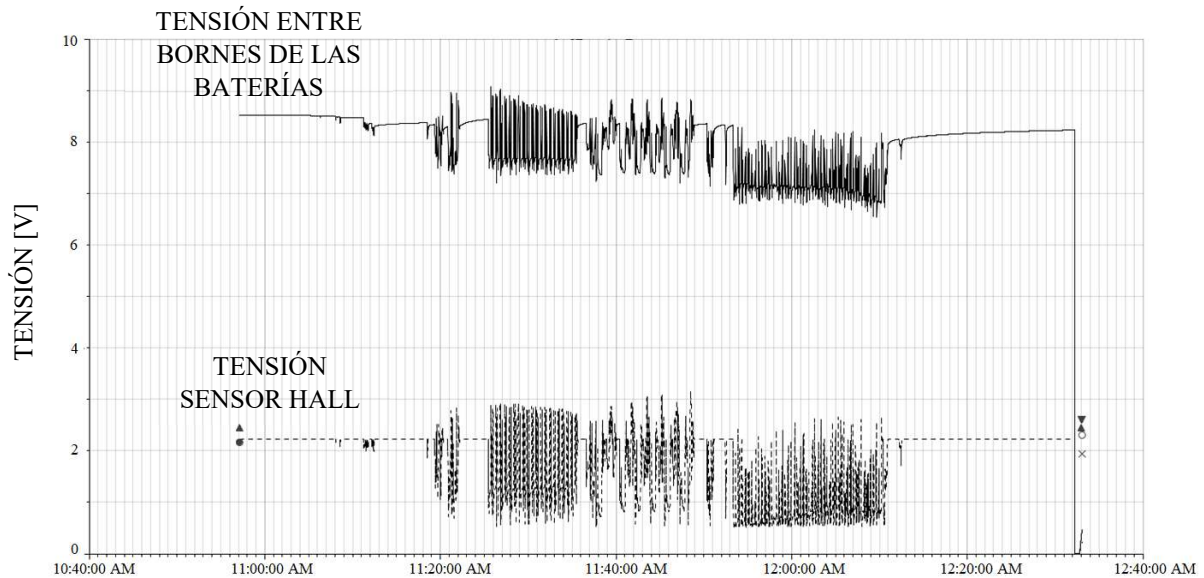
A continuación, se exponen los resultados obtenidos sobre el comportamiento energético del vehículo durante los circuitos y los procesos de carga de las baterías.

### **5.2.1. Resultados energéticos en los ensayos reales**

#### **5.2.1.1. Ensayos sin carga**

En esta primera puesta en marcha se realizaron las pruebas sin carga, de modo que el peso total era únicamente el propio peso del vehículo más el del conductor.

Una vez se realizaron las pruebas en vacío en los tres circuitos, se desmontó el registrador del vehículo y se conectó al ordenador. La gráfica de tensión e intensidad que arroja el software del dispositivo es la siguiente:

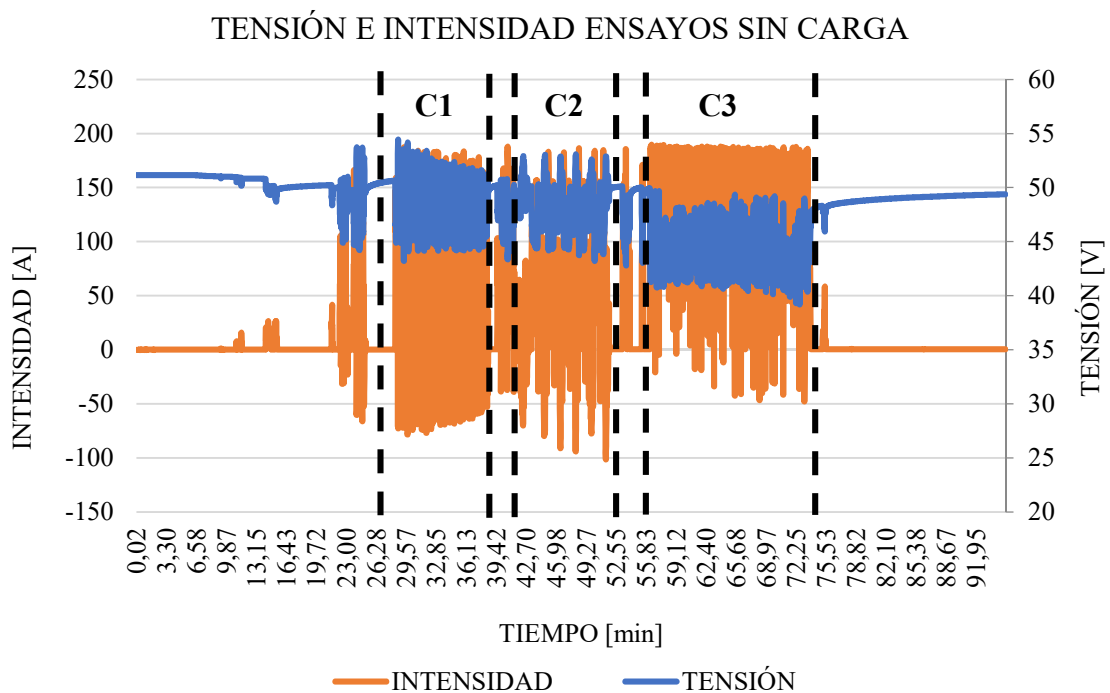


Gráfica 30: Tensiones registradas USB-5106 ensayo sin carga

A esta gráfica hay que aplicarle los cambios correspondientes para que muestre los valores reales de tensión e intensidad. En el caso de la tensión, hay que multiplicarla por 6 debido al divisor de tensión de la sonda utilizada para adecuar la tensión de entrada del dispositivo, que recordamos es de 2.5 V.

El caso de la intensidad es algo más complejo. Los cambios a la gráfica hay que hacerlos de acuerdo a la hoja de características del sensor Hall, mostrada en el Anexo 2: Aparatos y dispositivos.

De este modo, a continuación se muestra la gráfica general que muestra tanto la tensión como la corriente de entrada/salida reales de las baterías durante la realización de los tres circuitos sin carga.

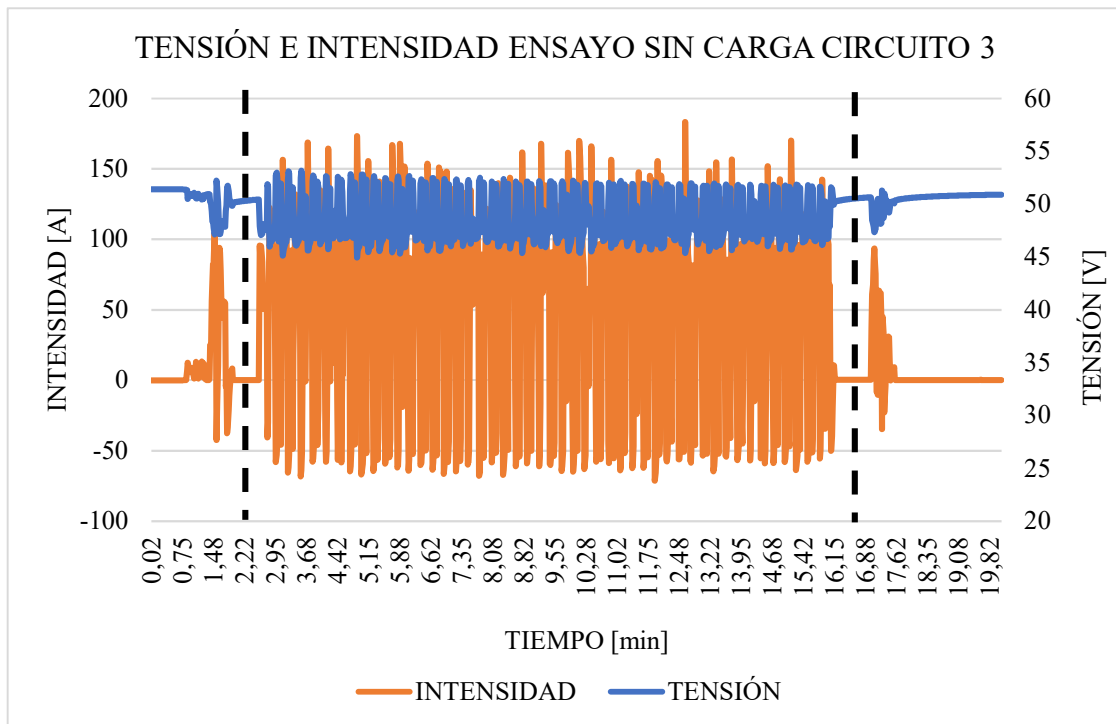


Gráfica 31: Tensión e intensidad ensayos sin carga

Como se puede apreciar, la tensión una vez finalizado el circuito 3 es mucho menor a la inicial, lo que significa que la realización del ensayo ha supuesto un desgaste para las baterías del vehículo.

Tanto la tensión como la intensidad oscilan según el tramo recorrido y las necesidades del vehículo. Podemos observar tramos de consumo, en los que la intensidad toma valores cercanos a los 200 A y la tensión decae. También existen tramos de regeneración, en los que es el motor el que carga las baterías. En estos casos, la intensidad es negativa ya que pasa a entrar en las baterías, y la tensión aumenta.

Se puede apreciar que en el tercer circuito, la tensión había decaído claramente respecto a los otros dos, por lo que los datos obtenidos se desecharon y se realizó nuevamente el ensayo en vacío para el circuito 3 con las baterías completamente cargadas. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:



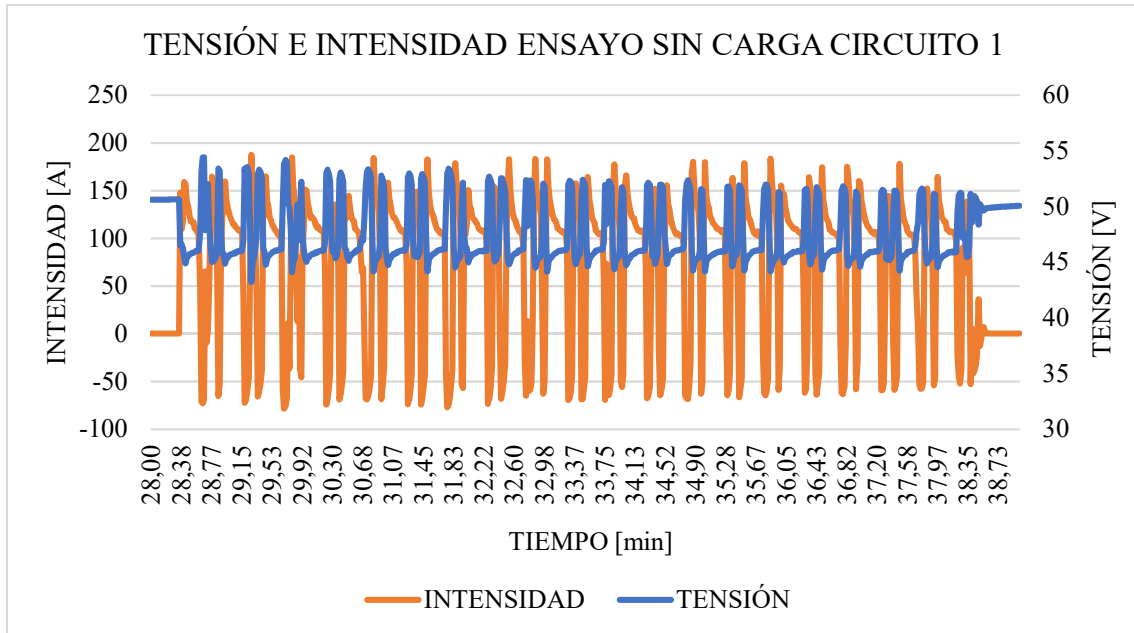
Gráfica 32: Tensión e intensidad ensayo sin carga Circuito 3

Comparando la tensión de la Gráfica 32 con la de la Gráfica 31, se puede apreciar que la tensión de las baterías toma valores considerablemente más altos. En el primer ensayo, la tensión varía entre los 40 V y los 48 V, en cambio en este segundo ensayo la tensión se encuentra dentro del intervalo comprendido entre los 45 y 54 V.

Si analizamos cada circuito más al detalle, podremos observar el comportamiento energético del vehículo en cada uno de ellos durante el recorrido.

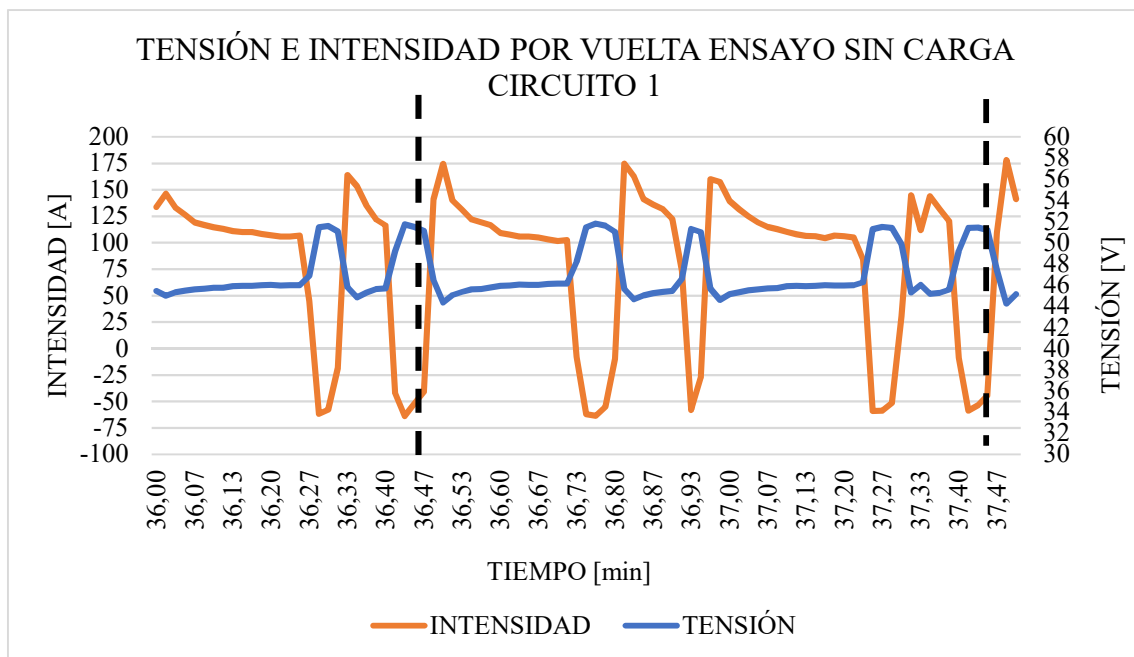
- **Circuito 1: Trayecto en recta**

Graficando la tensión e intensidad medidas con el registrador, los resultados obtenidos para este circuito son los siguientes:



*Gráfica 33: Tensión e intensidad ensayo sin carga Circuito 1*

Para poder observar mejor la variación de ambos parámetros, graficamos los resultados a lo largo de una vuelta al circuito.



*Gráfica 34: Tensión e intensidad por vuelta ensayo sin carga Circuito 1*

Se puede apreciar que las bajadas de tensión en las baterías coinciden con las subidas de intensidad. Esto se debe a que cuando el vehículo demanda energía, esta es aportada por las baterías, lo que implica una caída de la tensión y un aumento de la intensidad de salida. Pasa lo contrario en los tramos de deceleración, en los que se produce un incremento de la tensión de las baterías y la intensidad cambia de dirección, siendo la inercia del motor la que carga las baterías.

Observando en la Gráfica 34 el intervalo que comprende la vuelta estudiada, vemos que inicialmente hay una caída de tensión debido a la aceleración inicial de la recta larga del circuito. Esta bajada de la tensión se mantiene durante unos 15 segundos, que es aproximadamente el tiempo que se tarda en recorrer la primera recta. La intensidad durante este periodo aumenta ya que las baterías están cediendo energía al motor del vehículo.

Tras esto, vemos que se produce un aumento de la tensión de las baterías debido a la deceleración al final de la recta. Esta deceleración también implica que la intensidad pase bruscamente a ser negativa, lo que significa que en este tramo las baterías están siendo cargadas gracias a la inercia del motor.

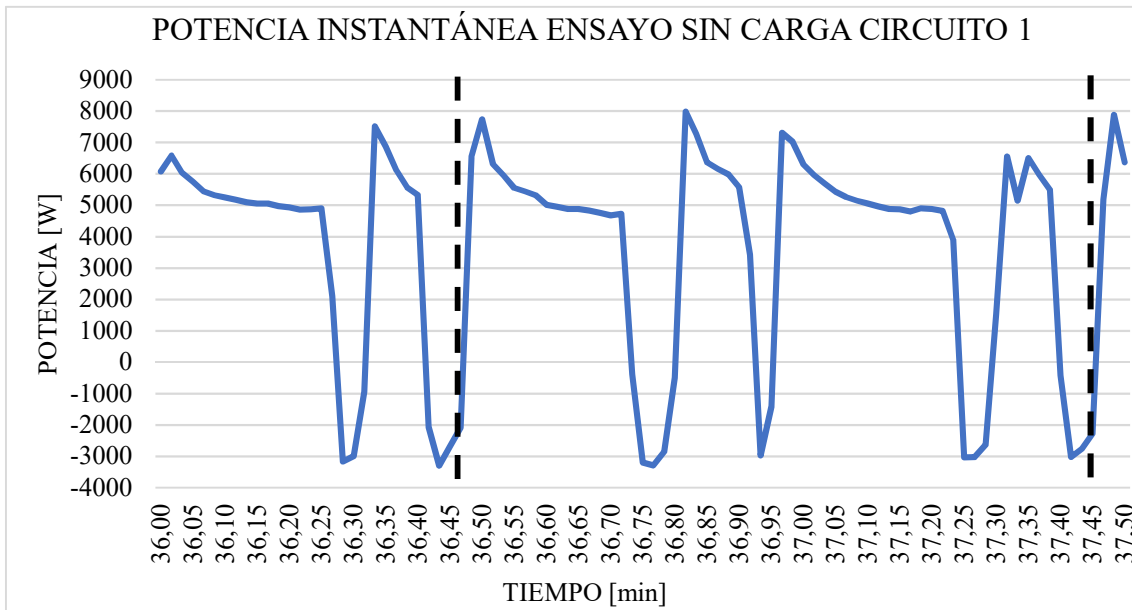
A continuación, observamos una nueva caída de la tensión, esta vez de menor duración. Esto coincide con el momento en el que recorremos la recta corta del circuito. La intensidad durante este tramo vuelve a subir.

Nuevamente, al llegar al final de la primera recta corta hay una recuperación de la tensión ya que dejamos de acelerar para tomar la curva. De nuevo la intensidad pasa a ser negativa ya que cambia de sentido y va del motor a las baterías.

A partir de aquí, el subciclo descrito anteriormente se repite. Se produce una primera caída de la tensión de las baterías de mayor duración debido al recorrido de la recta larga, con el correspondiente incremento de la intensidad. Posteriormente hay una recuperación de las baterías durante la frenada. Nuevamente una caída de tensión y subida de la intensidad durante el transcurso de la recta corta, y finalmente una recuperación al dejar de accionar el pedal del acelerador para tomar la curva.

Este ciclo apreciable en la Gráfica 34, se repite durante las 10 vueltas dadas al circuito.

Conociendo los valores de tensión e intensidad, podemos obtener la potencia instantánea requerida para cada segundo registrado. De este modo, la potencia por vuelta en el primer circuito es:



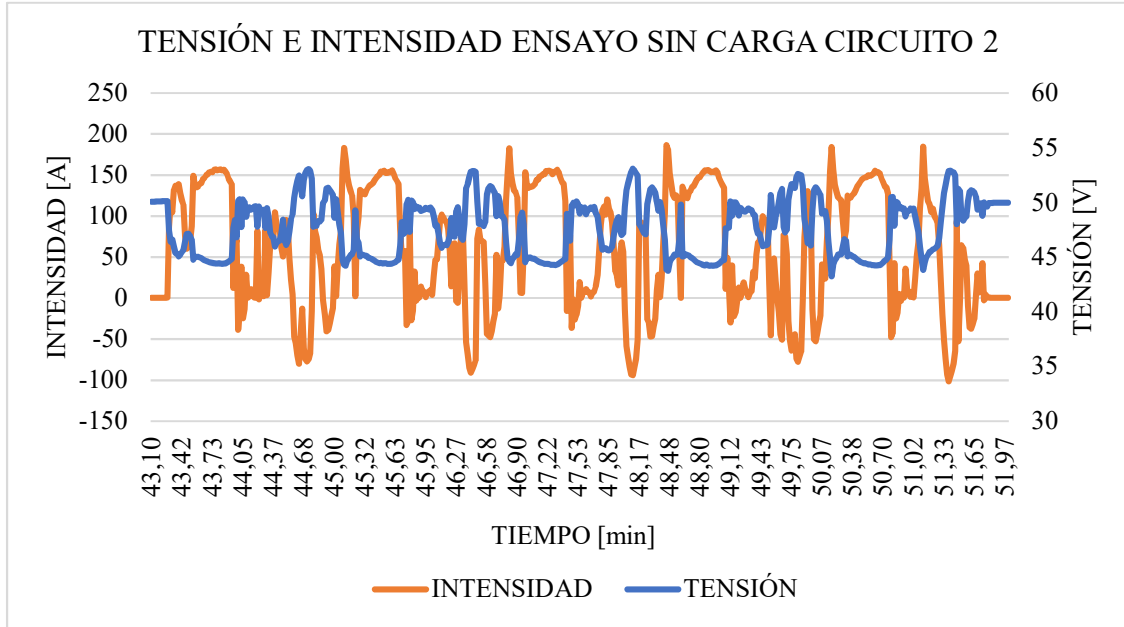
Gráfica 35: Potencia instantánea ensayo sin carga Circuito 1

La gráfica de la potencia sigue una distribución muy parecida a la de la intensidad. Esto se debe a que la tensión a lo largo del circuito varía dentro de un intervalo relativamente pequeño, entre los 52 y los 44 V aproximadamente tal y como se parecía en la Gráfica 33. La intensidad en cambio varía fuertemente, desde casi los 190 A de salida en los momentos de aceleración, hasta los 70 A de entrada a las baterías en los momentos de deceleración. La potencia, al ser el producto de la tensión por la intensidad, y la tensión tener una variación pequeña comparado con la intensidad, es esta última la que influencia en gran medida la forma de la curva de potencia.

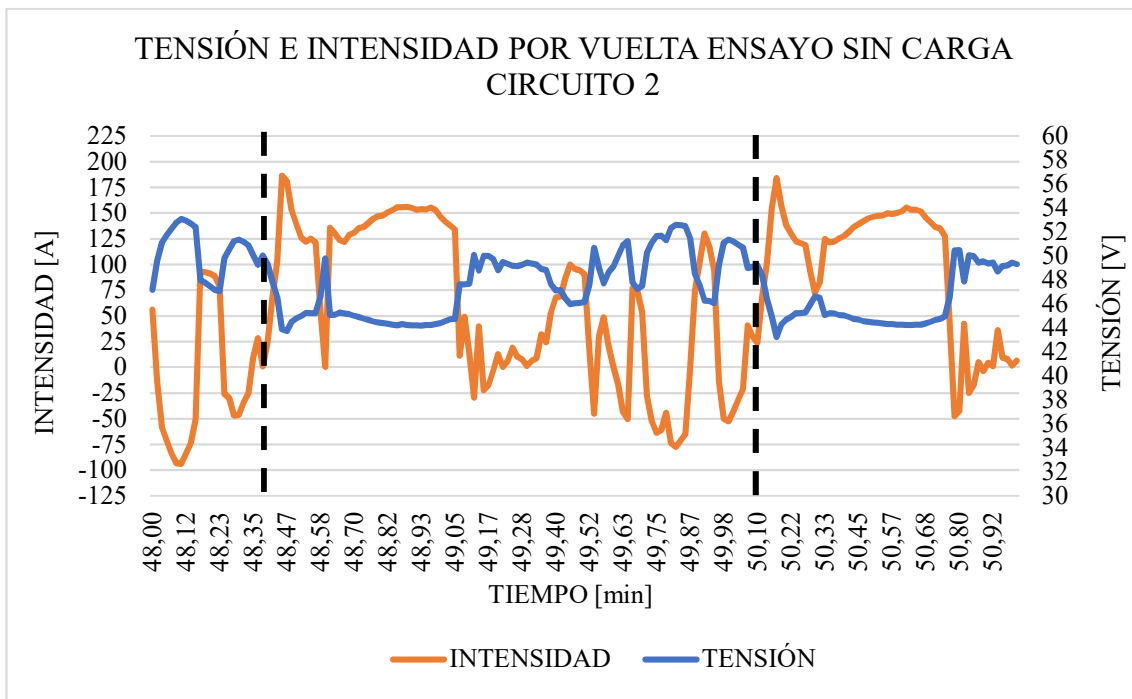
En los tramos de las rectas se observa una gran demanda de potencia, sobre todo al inicio de las mismas, donde encontramos picos cercanos a los 8 kW. En cambio, en los tramos de frenada ante las curvas se puede apreciar una regeneración de las baterías que llega a alcanzar un valor superior a los 3 kW. Esta regeneración no es ni mucho menos total, ya que el rendimiento de la recarga es bajo.

- **Circuito 2: Trayecto en rampa**

Para el caso del circuito en rampa, los resultados de tensión e intensidad son los siguientes:



Gráfica 36: Tensión e intensidad ensayo sin carga Circuito 2



Gráfica 37: Tensión e intensidad por vuelta ensayo sin carga Circuito 2

Observando la Gráfica 37 se ve que durante el tramo de ascenso de la cuesta hay un gran consumo de energía, ya que la tensión cae bruscamente y la intensidad de salida de las baterías se dispara hasta casi los 200 A en la aceleración inicial y los 160 A en la subida.

Una vez arriba el consumo es prácticamente nulo ya que la velocidad para cambiar de sentido es muy baja.

Al bajar la cuesta vemos que la tensión sube y la intensidad es mayormente negativa salvo algún momento puntual correspondiente a pequeños acelerones durante la bajada, por lo se trata de un tramo de gran regeneración para las baterías. Una vez ya acabada la cuesta, observamos un pico de intensidad correspondiente al tramo final hasta cambiar de nuevo de sentido, antes de lo cual hay una fuerte caída de la intensidad de las baterías debido a la deceleración.

La potencia obtenida en el circuito es por tanto:



*Gráfica 38: Potencia instantánea ensayo sin carga Circuito 2*

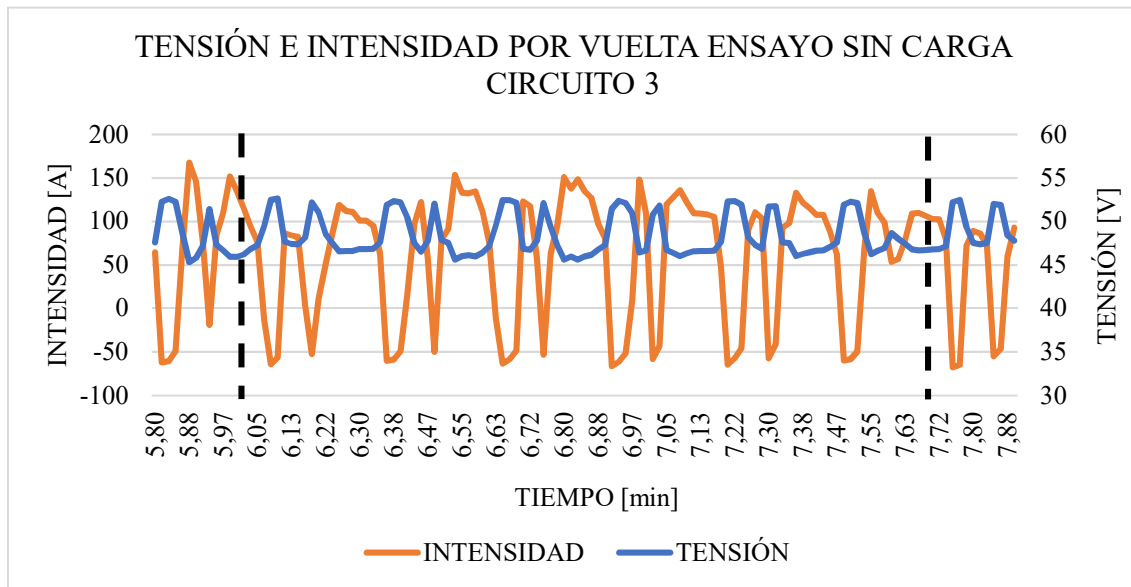
Viendo la Gráfica 38, se puede observar que durante la primera mitad del circuito el consumo de potencia es mucho mayor. Esto coincide con el tramo de ascenso a la cuesta, donde el vehículo ha de superar una gran resistencia a la pendiente.

En la segunda mitad correspondiente al descenso de la cuesta, la potencia requerida es mucho menor ya que en este caso la componente de la resistencia a la pendiente no solo no se opone al avance, si no que lo favorece fuertemente. Esto hace que durante el tramo de bajada la potencia sea negativa, lo que implica que las baterías se recargan durante el descenso.



- **Circuito 3: Trayecto con curvas**

La evolución de la tensión y la intensidad en este circuito se ha mostrado en la Gráfica 32, ya que para este circuito fue necesario repetir el ensayo. Si observamos la evolución de la tensión y la intensidad a lo largo de una vuelta observamos lo siguiente:



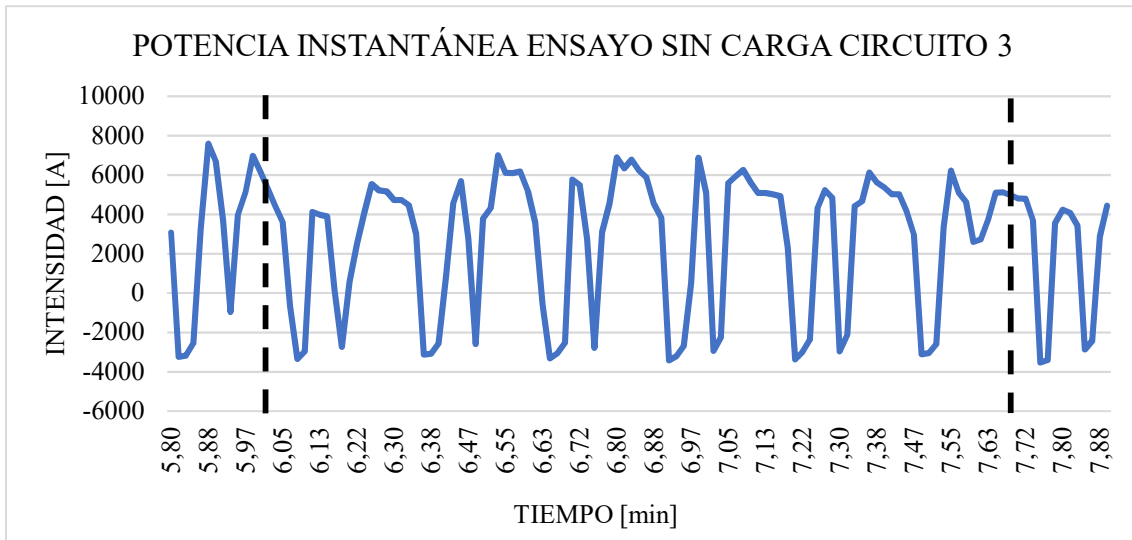
*Gráfica 39: Tensión e intensidad por vuelta ensayo sin carga Circuito 3*

Como ya se ha comentado anteriormente, este circuito trata de simular un entorno urbano. Como es común en este tipo de escenarios, los acelerones, frenadas y curvas son constantes a lo largo del recorrido. Todo esto se puede apreciar en las gráficas de tensión e intensidad de este circuito, Gráfica 32. Debido a las constantes curvas en el circuito, podemos observar cómo ambos parámetros varían continuamente a lo largo de la vuelta, Gráfica 39.

Los tramos de caída de tensión y de alta intensidad coinciden con las rectas. Podemos observar que la duración de estos tramos no es siempre la misma, ya que esto depende de la longitud de la recta. En las rectas cortas apenas duran 3 o 4 segundos, mientras que las rectas largas duran en torno a 9 s.

Por otro lado, observamos caídas bruscas y puntuales de intensidad y picos de tensión continuamente. Estos coinciden con las deceleraciones y frenadas antes de tomar las curvas.

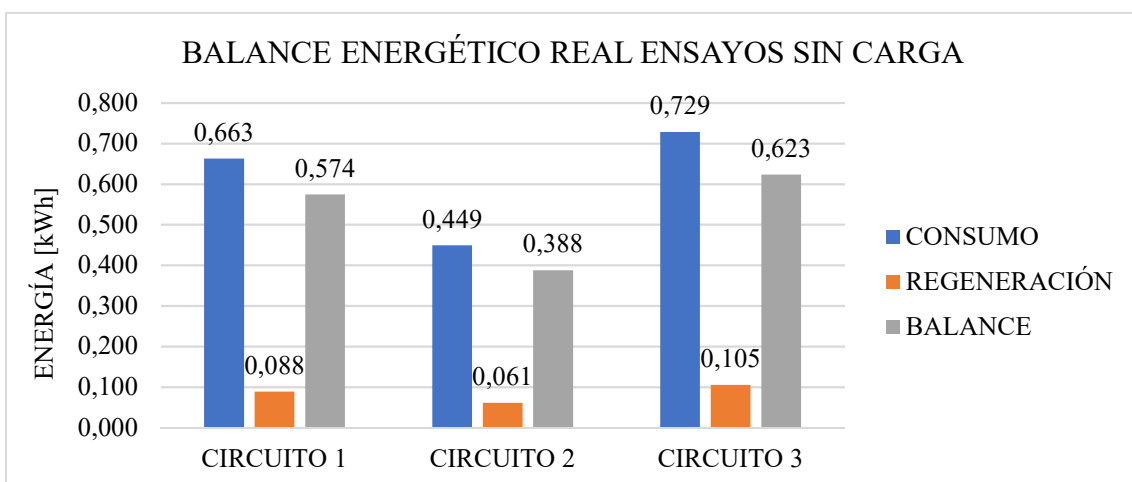
De este modo, la potencia a lo largo del circuito es la siguiente.



Gráfica 40: Potencia instantánea ensayo sin carga Circuito 3

La variación en la potencia a lo largo de la vuelta al circuito coincide con lo observado en la gráfica de tensión e intensidad, Gráfica 39. Los instantes de mayor potencia coinciden con las rectas del circuito y las bajadas bruscas y puntuales coinciden con los levantamientos del pedal del acelerador al llegar a las curvas dando lugar a una regeneración de las baterías.

Conocidas las gráficas de potencia instantánea respecto al tiempo de los tres circuitos, podemos conocer el consumo y la regeneración de energía del vehículo calculando el área bajo la curva de los tramos de potencia positiva y negativa respectivamente.



Gráfica 41: Balance energético real ensayos sin carga

En la Gráfica 41 observamos que el balance de consumo más alto tiene lugar en el tercer circuito ya que es en el que mayor espacio se recorre por vuelta y el que más tiempo dura. Además, la gran cantidad de frenadas debido a la alta frecuencia de curvas da lugar a que la regeneración sea muy alta.

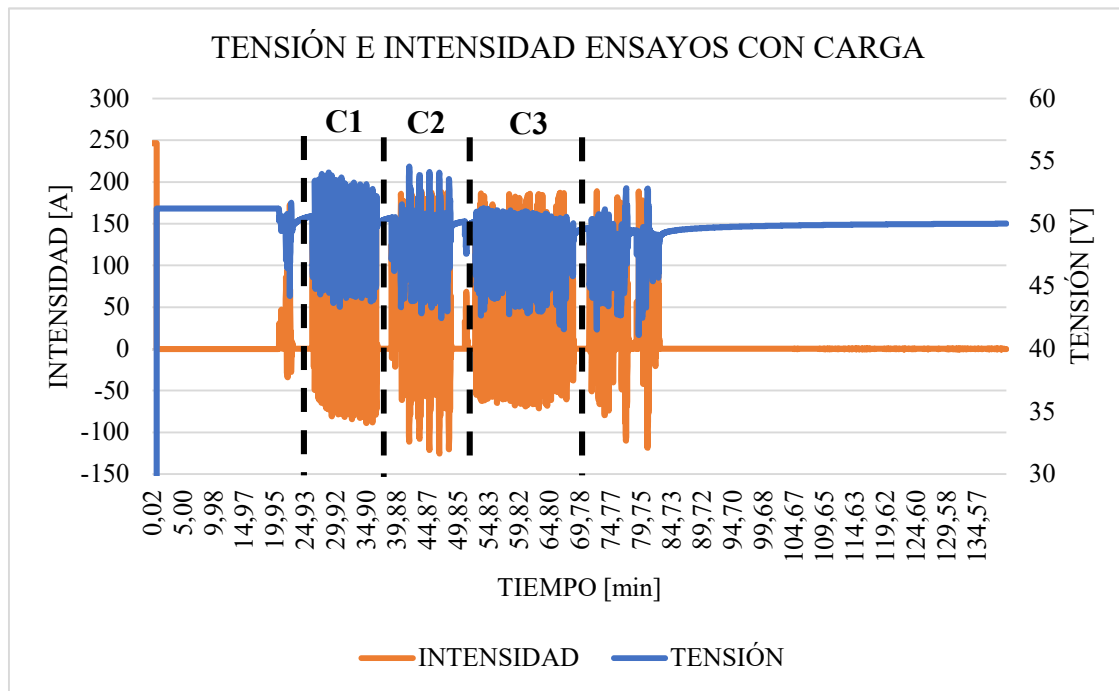
A continuación, encontramos el ensayo del trayecto en recta, en el que las altas velocidades y las escasas curvas dan lugar a un consumo bastante elevado.

Finalmente encontramos el circuito en cuesta ya que como únicamente se han realizado cinco vueltas, el tiempo en funcionamiento y la distancia recorrida han sido considerablemente menor al resto de ensayos.

Tal y como se ha comentado a nivel teórico, dado que cada uno de los circuitos tiene unas características diferentes en cuanto a distancia recorrida, velocidades, tiempo por vuelta... resultaría interesante ver qué tipo de circuito sería más duro para el vehículo en condiciones similares. Esto se llevará a cabo posteriormente una vez se observen los resultados obtenidos en el caso de las pruebas con carga.

### 5.2.1.2. Ensayos con carga

En este caso, se repitieron los ensayos realizados pero esta vez con el cajón trasero del Zylog cargado con 250 kg.



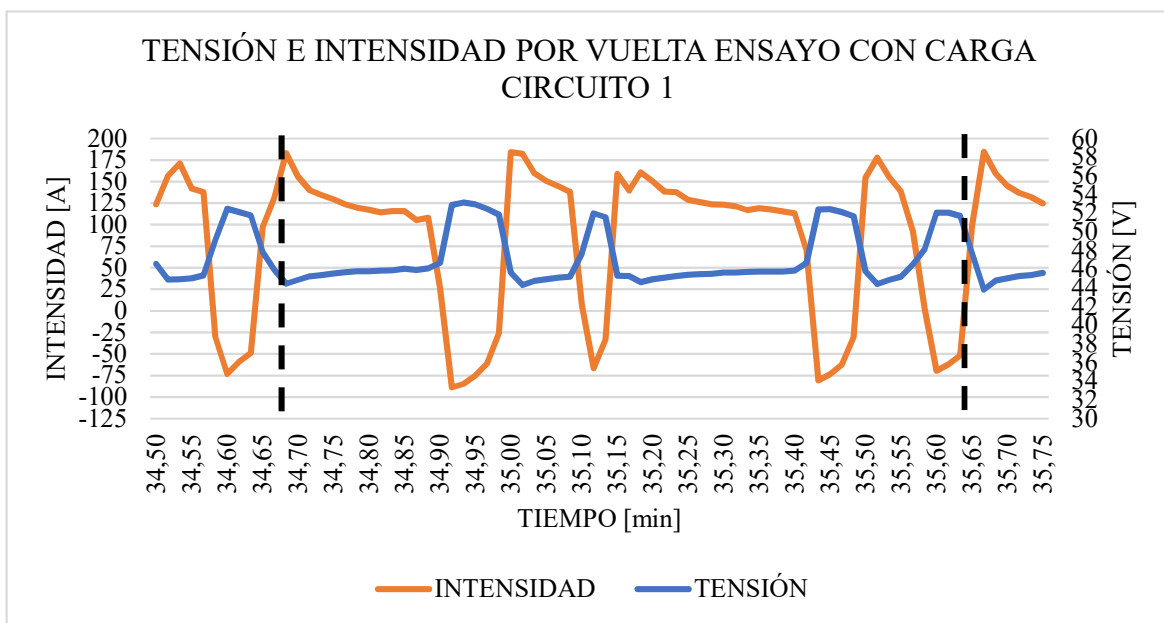
Gráfica 42: Tensión e intensidad ensayos con carga

En la Gráfica 42 se puede apreciar claramente como el nivel de tensión de las baterías decae conforme se van realizando los circuitos del ensayo con carga.

A continuación, se procede a analizar la potencia instantánea requerida y el consumo en cada uno de los circuitos comparándolo con los resultados obtenidos de las pruebas sin carga.

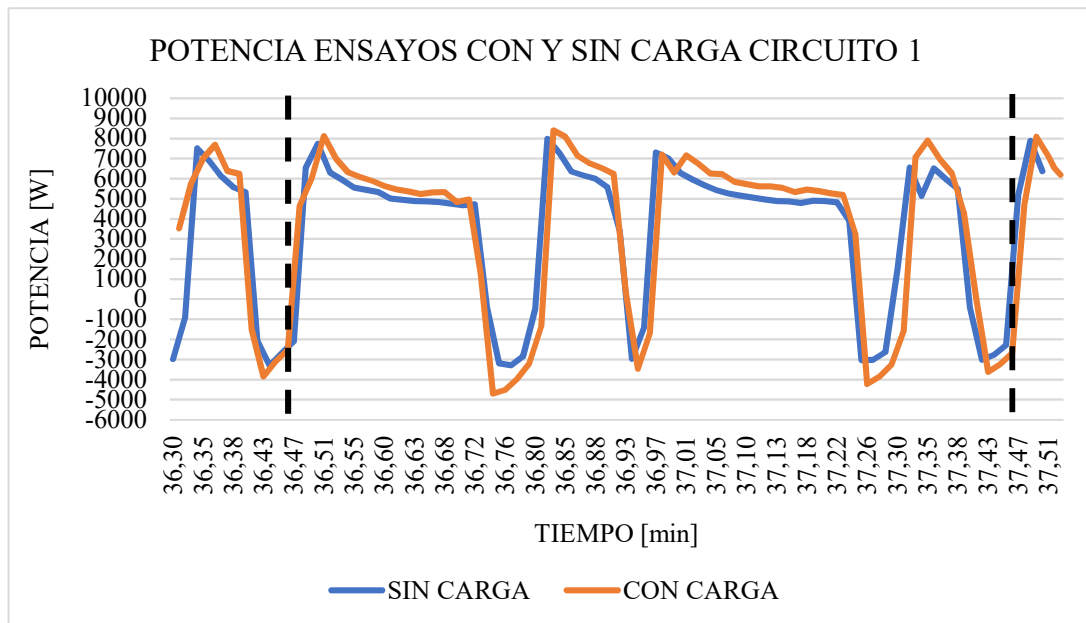
- **Circuito 1: Trayecto en recta**

La gráfica de la evolución de la tensión y la intensidad a lo largo de una de las vueltas realizadas al circuito es la siguiente:



Gráfica 43: Tensión e intensidad por vuelta ensayo con carga Circuito 1

Los valores alcanzados de tensión son algo más extremos que en la prueba en vacío, Gráfica 34, tomando valores levemente más altos en los tramos de regeneración, y más bajos en los de consumo. Respecto a la intensidad, los máximos alcanzados son más altos, ya que en este caso encontramos máximos de 185 A, mientras que en el caso de la prueba en vacío son de 175 A.



Gráfica 44: Potencia ensayos con y sin carga Circuito 1

Comparando la potencia de los ensayos con y sin carga podemos observar que transportando los 250 kg, la potencia es mayor durante las rectas. La explicación es que las baterías tienen una demanda mayor de potencia debido a que el peso a desplazar es más alto.

En los tramos de deceleración, la potencia decae en mayor medida, lo que implica que la regeneración de las baterías también es mayor con el vehículo cargado. Esto se debe a que dejamos de accionar antes el pedal del acelerador y la inercia del vehículo es mayor, lo que hace que se genere una fuerza contraelectromotriz mayor y que el motor transmita más carga a las baterías.

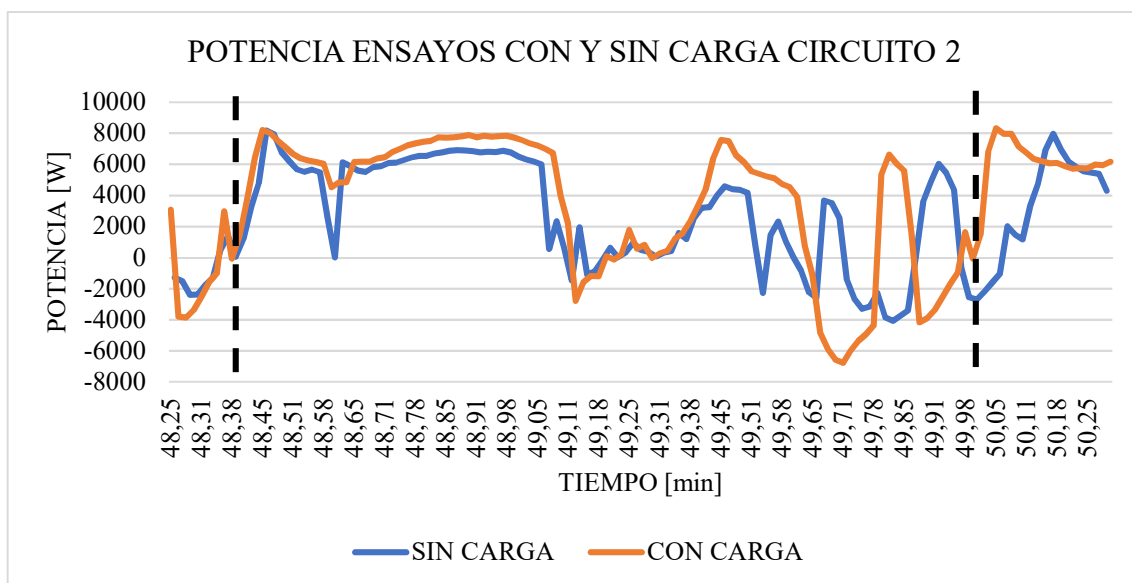
- **Circuito 2: Trayecto en rampa**

En este circuito, los resultados obtenidos de tensión e intensidad con el vehículo cargado son los siguientes:



Gráfica 45: Tensión e intensidad por vuelta ensayo con carga Circuito 2

En este caso, tanto los picos de intensidad de salida y entrada de las baterías como la tensión, toman valores más extremos que en la prueba en vacío. Estas diferencias pueden apreciarse comparando las gráficas de potencia obtenidas entre los ensayos con y sin carga.



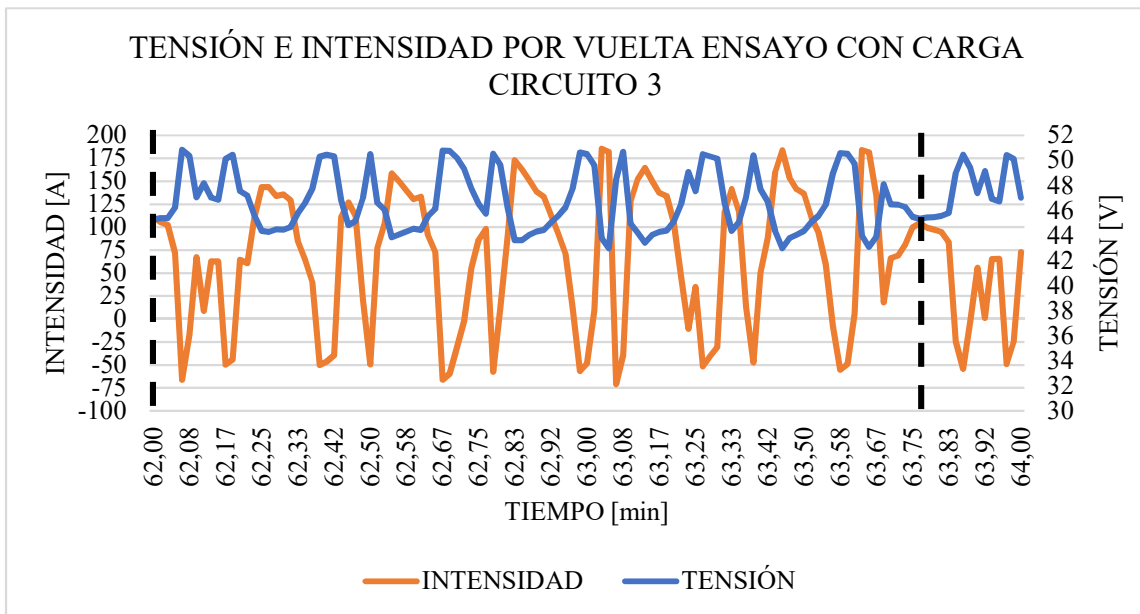
Gráfica 46: Potencia ensayos con y sin carga Circuito 2

Observando la Gráfica 46, vemos que la potencia durante la subida con el Zylog cargado es superior a la prueba en vacío y que durante el descenso de la cuesta la regeneración de las baterías también es mayor.

Dado que el vehículo es más pesado, la resistencia al avance es mayor durante la subida, lo que implica que se necesite más potencia para ascender. Por otro lado, al estar el vehículo más cargado, coge velocidad más rápido y apenas es necesario accionar el acelerador durante la bajada, lo que significa una mayor regeneración de las baterías. En este tramo vemos que las gráficas comparadas se descomparan, esto se debe a que como se vio en los resultados cinemáticos, la bajada con el vehículo cargado se realiza más rápido.

- **Circuito 3: Trayecto con curvas**

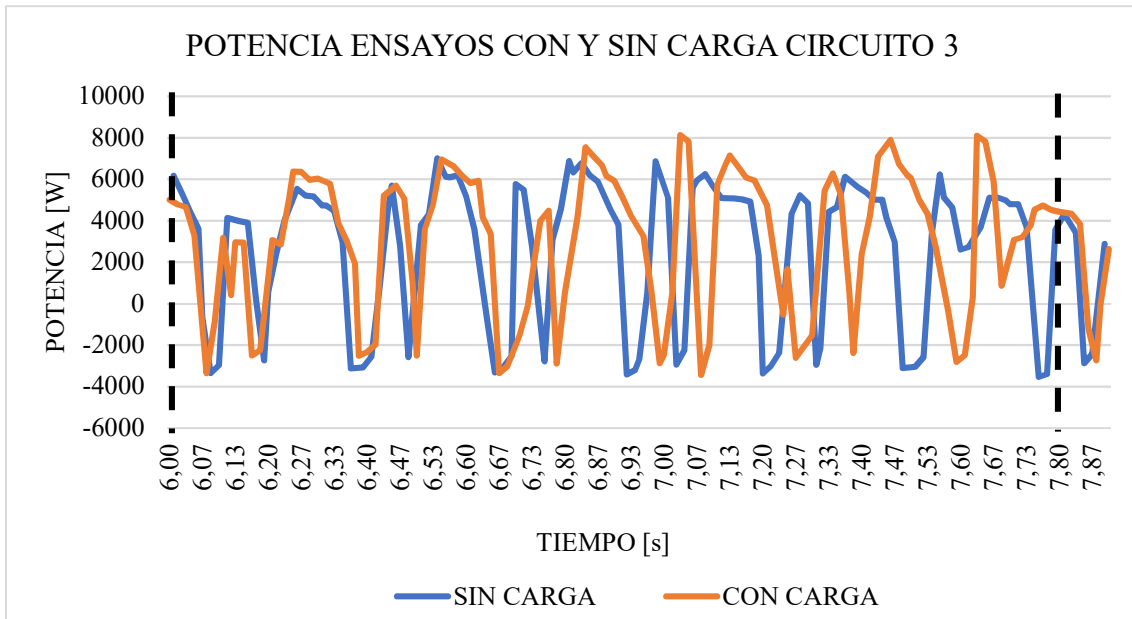
En este último circuito, la tensión e intensidad de las baterías varió de la siguiente manera:



Gráfica 47: Tensión e intensidad por vuelta ensayo con carga Circuito 3

Los valores de tensión tanto máximos como mínimos toman valores más bajos que en el ensayo en vacío. Esto se debe a que al ser necesario repetir el circuito tres en las pruebas sin carga, la prueba se hizo con las baterías completamente cargadas. En cambio, la prueba con carga se realizó habiendo realizado previamente los circuitos 1 y 2, por lo que las baterías se encontraban más descargadas. Pese a esto, el rango de variación de la tensión entre la máxima y la mínima registrada ronda los 7 V para ambos ensayos.

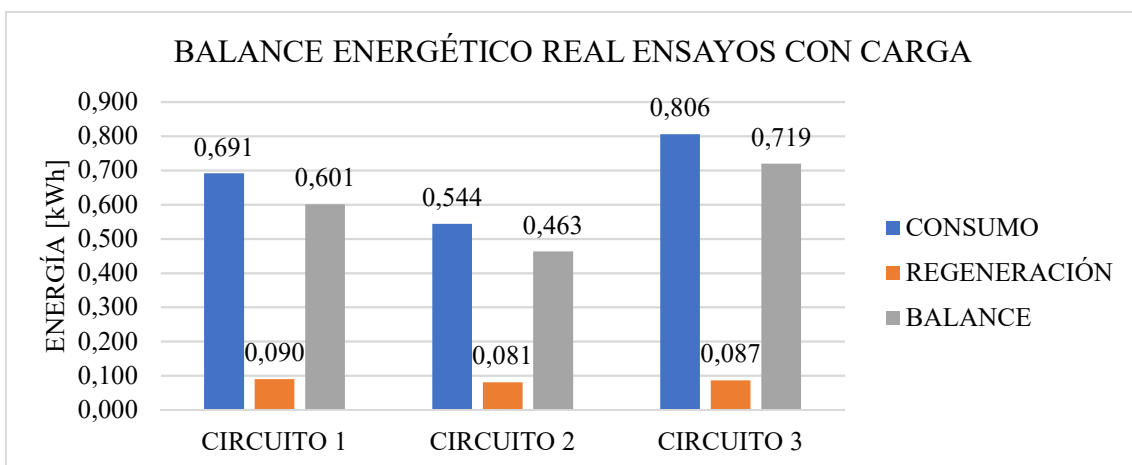
Respecto a la intensidad, en los tramos de demanda de energía la intensidad es más alta en los ensayos con carga, tomando valores máximos en torno a los 175 A frente a los 150 A del ensayo en vacío. La regeneración en cambio es muy similar, tomando la intensidad valores levemente más negativos en la prueba con carga.



Gráfica 48: Potencia ensayos con y sin carga Circuito 3

Tal y como se puede apreciar en la Gráfica 48, la potencia instantánea en los tramos de consumo es más elevada con el Zylog cargado. En cambio, en los tramos de frenada la regeneración es muy similar para ambos ensayos, incluso llegando a ser inferior con el vehículo cargado. Esto se debe a que el vehículo cargado no tiene los cambios de velocidad tan bruscos que tenía yendo en vacío. Al ir cargado, se conduce más cuidadosamente y no se alcanzan velocidades tan altas en las rectas largas, de modo que el vehículo recorre todo el circuito a una velocidad más similar en todos los tramos.

En cuanto al consumo, conociendo la potencia en cada instante de tiempo durante el desarrollo de los circuitos, podemos conocer la energía consumida.



Gráfica 49: Balance energético real ensayos con carga

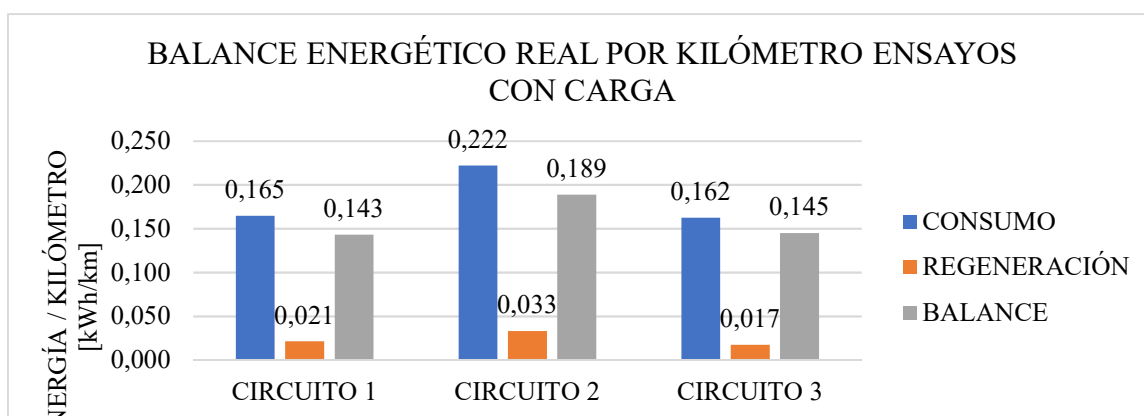


Comparando este balance con el del ensayo sin carga de la Gráfica 41, observamos que en el consumo final es mayor para todos los circuitos en las pruebas con el vehículo cargado.

En el trayecto en recta y en rampa, tanto el consumo como la regeneración han aumentado al realizar las pruebas con el Zylog cargado. El consumo lo ha hecho en mayor medida que la regeneración, por lo que en el balance final el consumo es más elevado.

Respecto al trayecto con curvas, se puede observar que con los 250 kg de carga además de dar lugar a un aumento en el consumo, implican una menor regeneración. Esto hace que sea el circuito con la mayor diferencia entre el consumo final con el vehículo cargado y en vacío.

Si se quiere analizar cuál de los tres circuitos es más duro para el Zylog, una buena forma de hacerlo es comprobar el consumo del vehículo por kilómetro recorrido en cada uno de los recorridos realizados. Dado que se trata de un vehículo de transporte de mercancías, esta comparativa se va a realizar con los resultados obtenidos en los ensayos de carga.



*Gráfica 50: Balance energético real por kilómetro ensayos con carga*

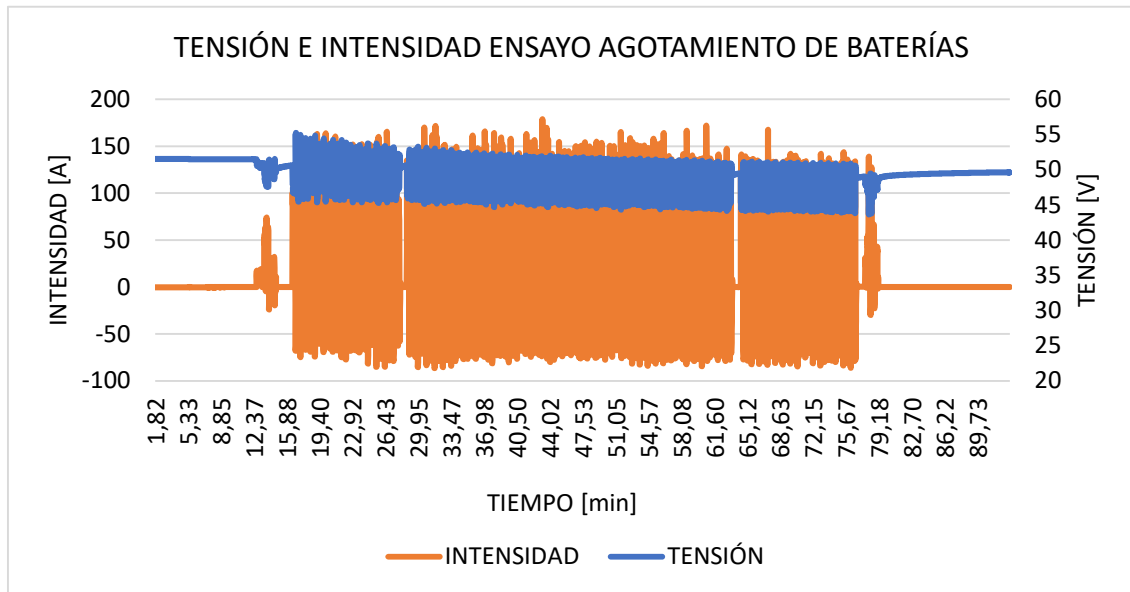
Desde el punto de vista de la distancia recorrida, el consumo se dispara en el circuito en rampa. El consumo durante las subidas es muy alto y la regeneración en las bajadas no es suficiente como para reducir el consumo neto final. En este caso, se demuestra que la pendiente es un factor muy importante en el consumo del vehículo ya que pese a ir considerablemente más rápido en otros circuitos, el hecho de tener una resistencia a la pendiente tan alta hace que el consumo sea muy elevado.

Los trayectos en recta y con curvas alcanzan valores de velocidad similares y pese a que la resistencia a la rodadura es mayor en el trayecto con curvas, el consumo es muy similar. Esto quiere decir que la velocidad tiene un mayor impacto sobre el consumo que la rodadura.

### 5.2.1.3. Ensayo de agotamiento de baterías

Para tratar de analizar la autonomía del vehículo, se realizó una prueba de larga duración cuyo objetivo era ver la evolución de la descarga de las baterías del Zylog. Esta prueba se llevó a cabo en el Circuito 1, el trayecto en recta, con el vehículo en vacío.

Cabe mencionar, que como tras realizar los ensayos con y sin carga se percibió cierto olor procedente de la parte trasera del vehículo donde está ubicado tanto el motor como el controlador, se decidió hacer alguna parada a lo largo del ensayo para controlarlo.



Gráfica 51: Tensión e intensidad ensayo agotamiento de baterías

De la Gráfica 51, lo que más interesa para el objetivo de este ensayo es cómo la tensión va decayendo a lo largo de las vueltas al circuito. Observamos que se parte de una tensión inicial de 51.52 V y tras el ensayo esta baja hasta los 48.92 V. Una vez el vehículo fue llevado de nuevo a la nave, las baterías se recuperaron levemente hasta llegar a los 50 V.

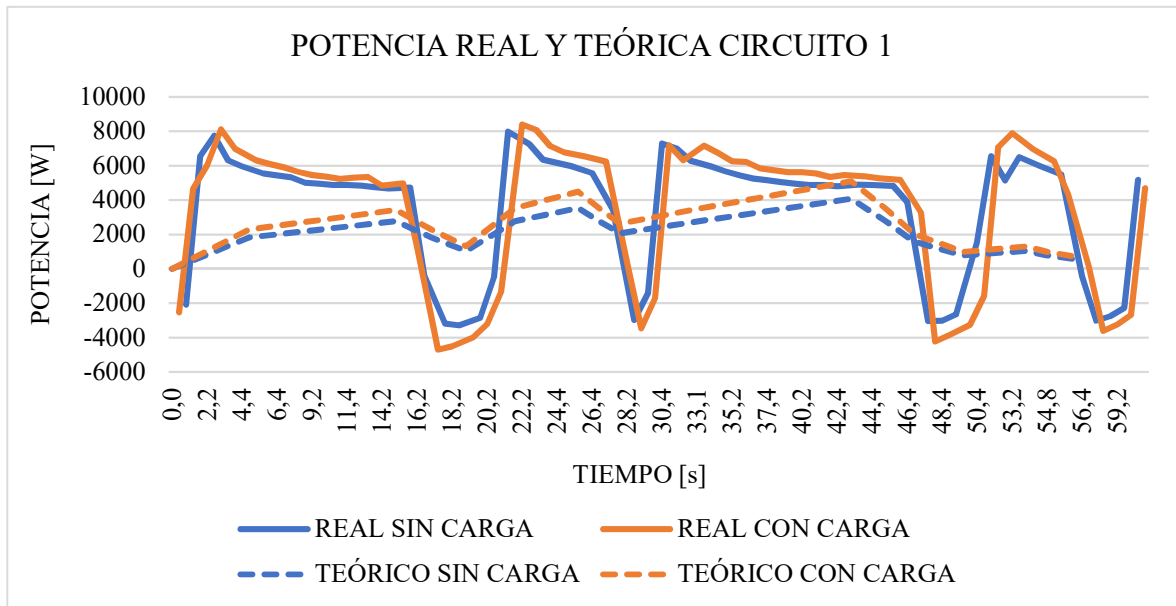
En esta misma gráfica también se pueden observar las dos paradas realizadas para controlar si el motor/controlador emitían algún tipo de olor a quemado, momento en el que la intensidad toma un valor de aproximadamente 0 A. Al no percibirse nada extraño, se prosiguió con la prueba hasta el final.

Tras los 60 minutos se habían realizado 67 vueltas al circuito y el vehículo indicaba una batería restante del 40 %, Ilustración 24. Teniendo en cuenta que cada vuelta al circuito son 420 m, Tabla 2, se había recorrido una distancia aproximadamente de 28 km.

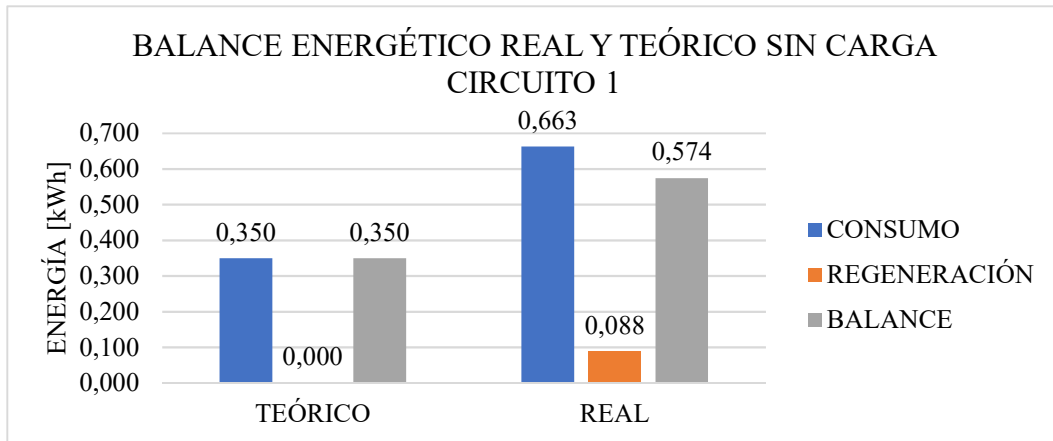
### 5.2.2. Comparativa entre resultados reales y teóricos

A continuación, una vez hechos los cálculos teóricos y conocidos los resultados reales, se procede a compararlos. De este modo, para cada circuito podremos ver las similitudes y discrepancias respecto a la potencia y los balances energéticos entre los resultados obtenidos.

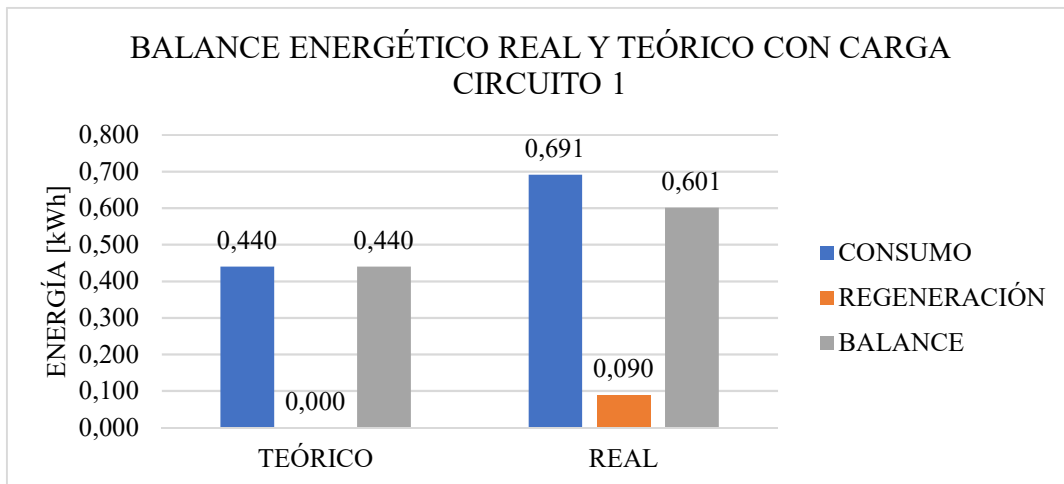
- **Circuito 1: Trayecto en recta**



Gráfica 52: Potencia real y teórica Circuito 1



Gráfica 53: Balance energético real y teórico sin carga Circuito 1



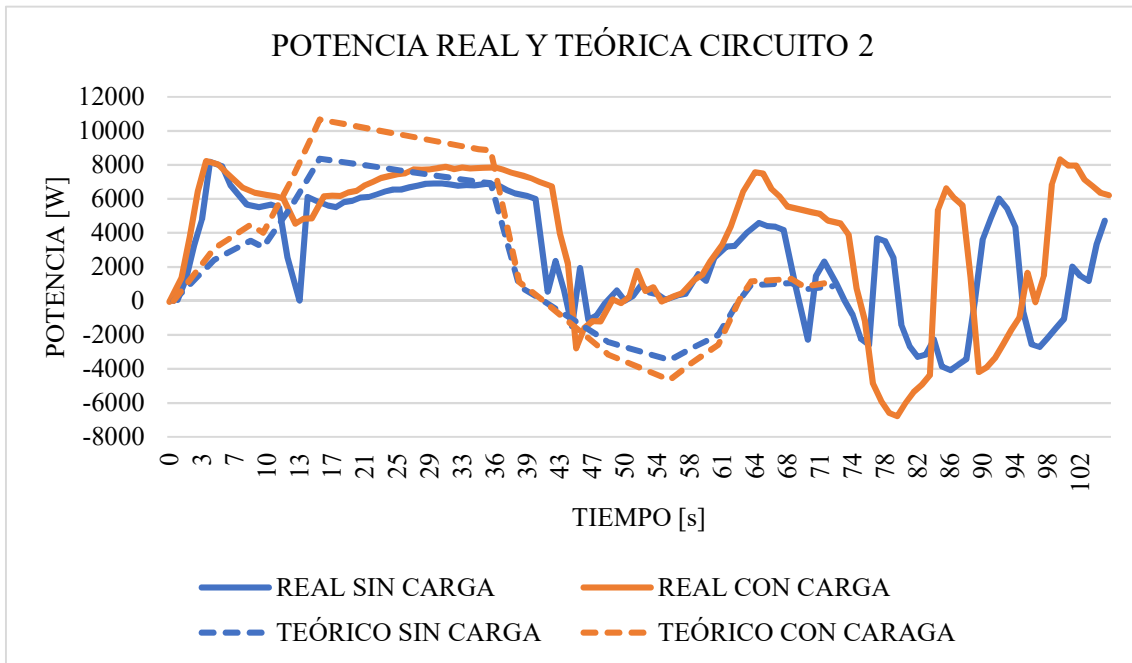
*Gráfica 54: Balance energético real y teórico con carga Circuito 1*

Se puede apreciar que tanto la potencia como el consumo en ambos ensayos, con y sin carga, es menor en el cálculo teórico.

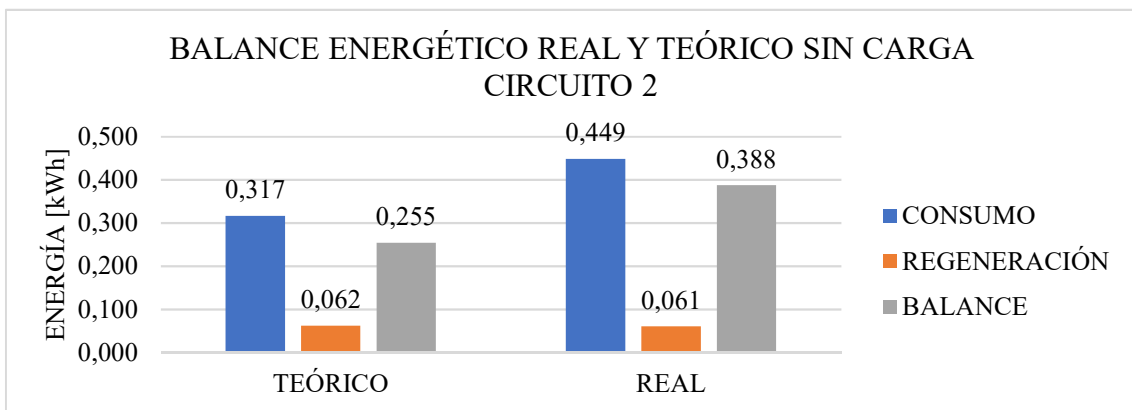
La potencia teórica queda por debajo de la real, aunque sí que muestra la misma tendencia en su comportamiento siendo más elevada durante las rectas y disminuyendo en los tramos de frenada.

Como resultado de los balances de energía, Gráficas 53 y 54, los consumos finales teóricos son aproximadamente el 60-70 % de lo real, siendo la regeneración prácticamente nula respecto a la experimentada en los ensayos. Dado que la potencia teórica ha resultado ser menor, y el tiempo teórico en dar una vuelta al circuito también es menor al real, es lógico que en el balance de energía el consumo real sea más alto pese a tener mayor regeneración. El hecho de que la regeneración teórica sea nula se debe a que con la formulación empleada no se puede tener en cuenta la recarga de las baterías en los momentos en los que se deja de accionar el acelerador. En estos tramos, el motor pasa a comportarse como un generador aprovechando la inercia del Zylog para inyectar corriente en las baterías.

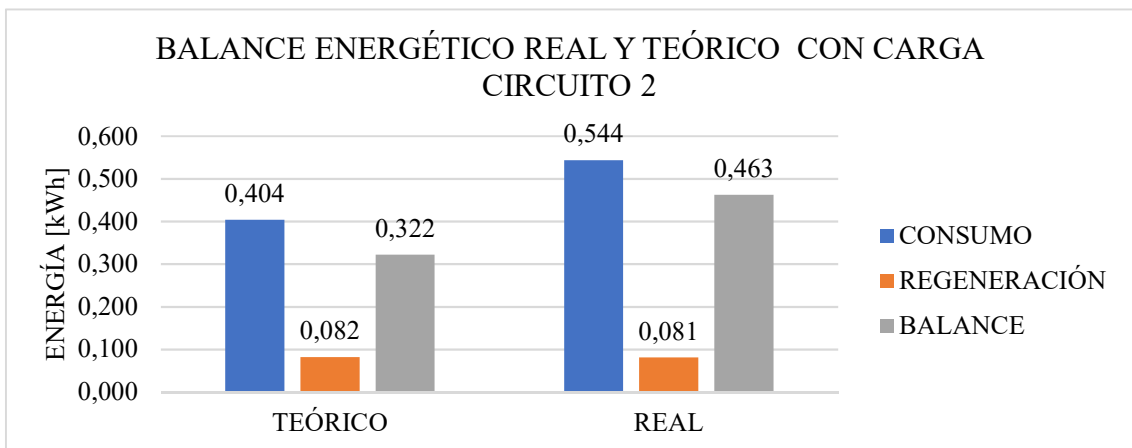
- **Circuito 2: Trayecto en rampa**



Gráfica 55: Potencia real y teórica Circuito 2



Gráfica 56: Balance energético real y teórico sin carga Circuito 2



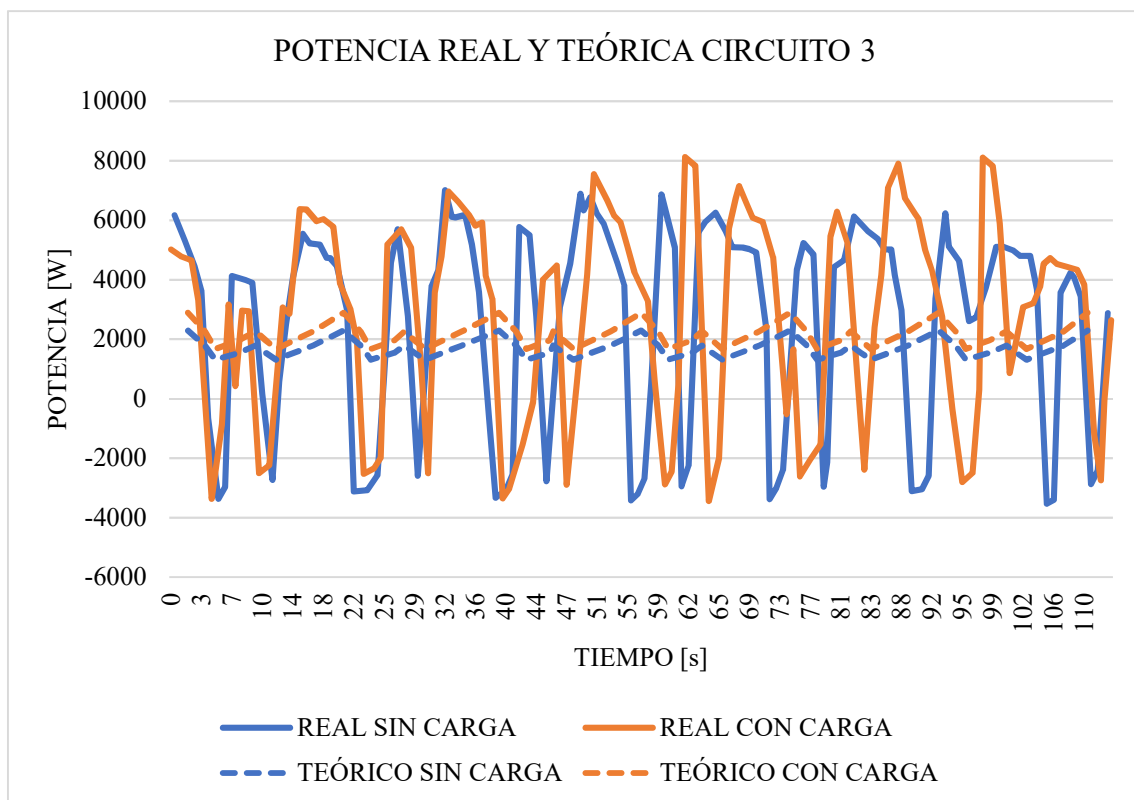
Gráfica 57: Balance energético real y teórico con carga Circuito 2

Como ya se ha comentado previamente, el hecho de que en el cambio de sentido una vez ascendida la cuesta se tuviese que hacer maniobra, supuso una gran demora respecto al tiempo estimado teóricamente. Es principalmente por esto por lo que las gráficas reales no se acompañan con las teóricas.

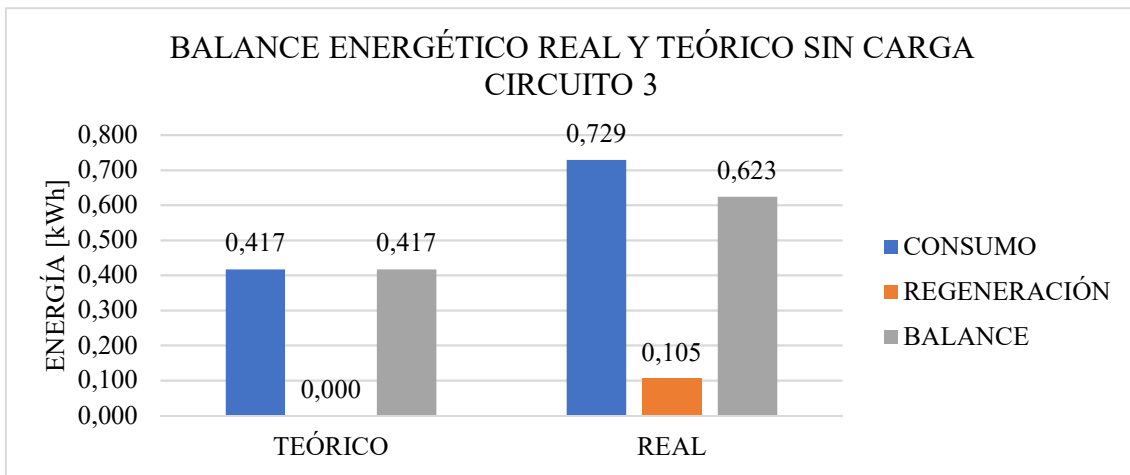
Pese a esto, en la Gráfica 56 se puede ver que la potencia teórica se ajusta e incluso excede con el vehículo cargado a los valores reales durante el ascenso y por el contrario, se queda algo por debajo de la potencia real durante el descenso de la cuesta.

Respecto a los consumos, observamos que en los cálculos teóricos el consumo se ha quedado en torno a un 70 % del real y la regeneración toma valores muy similares. Esto se debe a que el factor que mayor influencia tiene en este caso es la pendiente, y este sí que ha sido considerado con la formulación utilizada siendo capaz de superar la resistencia al avance producida por la resistencia a la rodadura y la aerodinámica.

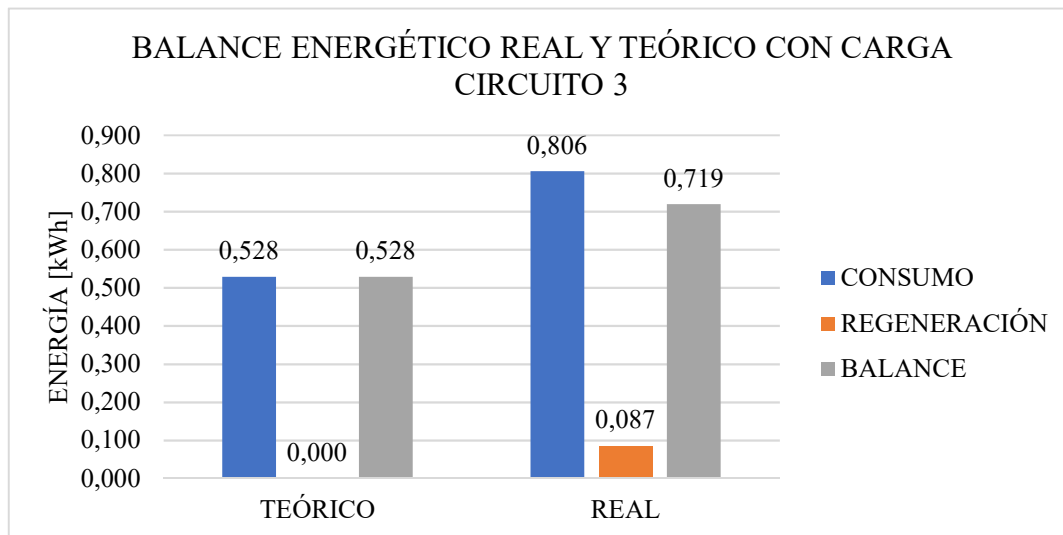
- **Circuito 3: Trayecto con curvas**



Gráfica 58: Potencia real y teórica Circuito 3



Gráfica 59: Balance energético real y teórico sin carga Circuito 3



Gráfica 60: Balance energético real y teórico con carga Circuito 3

Finalmente, en este tercer circuito la potencia y el balance de consumo teórico se queda muy por debajo del real. Un factor de vital importancia en este circuito es la deformación lateral del neumático debido a la gran cantidad de curvas a lo largo del recorrido. Con la formulación utilizada este parámetro no se ha podido tener en cuenta, por lo que se espera que la potencia y el consumo real sea superior al teórico para ambos ensayos, con y sin carga.

La nula regeneración a nivel teórico se debe a que la ausencia de pendiente en este circuito deja los cálculos sin parámetro que pueda explicar un movimiento del vehículo sin necesidad de consumir energía. Por otro lado, las formulas utilizadas no pueden explicar la regeneración eléctrica gracias a la inercia del vehículo en los tramos de deceleración.

En resumen, se puede apreciar que los cálculos teóricos muestran una potencia instantánea y un consumo por debajo de los valores reales de los ensayos con y sin carga. Estas diferencias pueden deberse a diversos factores.

En cuanto a la potencia mecánica calculada teóricamente, el hecho de no haber considerado el viento o la rodadura lateral del neumático o la posible inexactitud en parámetros como los coeficientes de rodadura y aerodinámico, superficie frontal del vehículo..., pueden influenciar en gran medida la potencia demandada por el vehículo.

Respecto a la potencia eléctrica, hay que recordar que esta se mide en los bornes de las baterías, por lo que a esta potencia hay que restarle las posibles pérdidas en los conductores, en el controlador, en el motor y en la transmisión.

Teniendo esto en cuenta, la diferencia entre potencia y consumo teórica y real, sería mucho menor a la que se aprecia en las gráficas mostradas en este apartado.

Además, la potencia es algo instantáneo y a nivel teórico se han considerado muy pocos puntos comparado con todos los registrados en las pruebas reales. De este modo, la curva únicamente mostraría la tendencia del comportamiento.

### **5.2.3. Resultados en los procesos de carga**

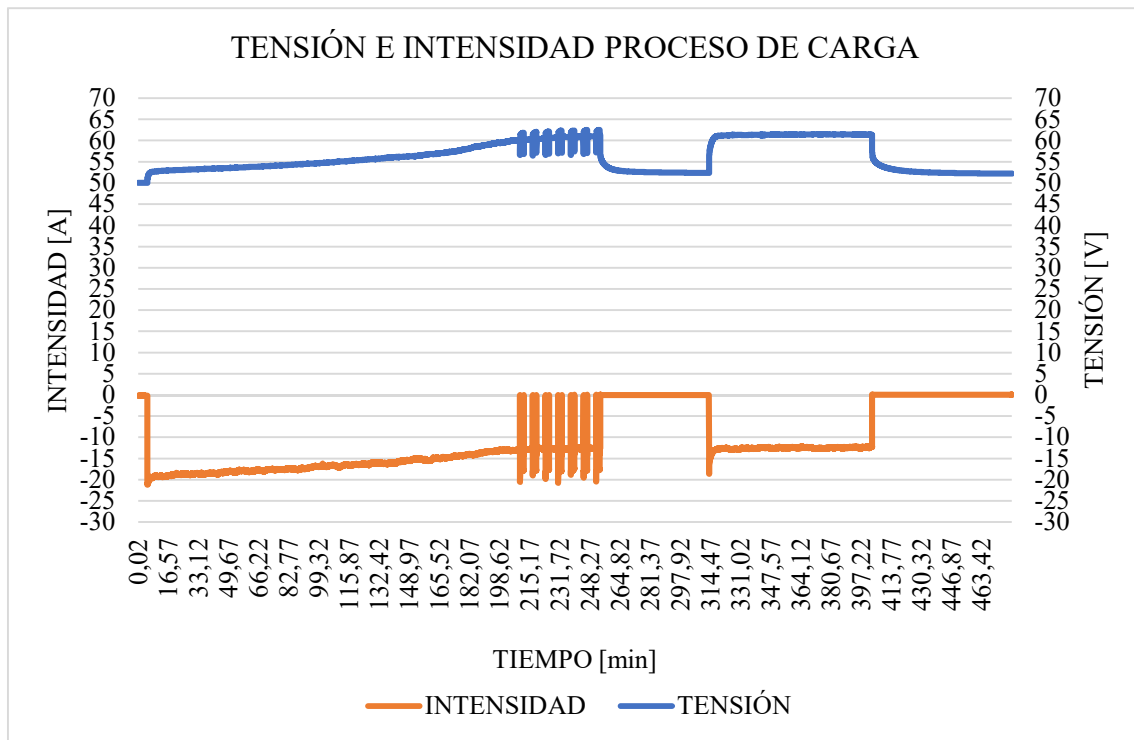
Para la realización de las pruebas prácticas en los diferentes circuitos era necesario que el Zylog tuviese sus baterías bien cargadas. Por ello, antes de cada ensayo las baterías eran cargadas para dejarlas en el estado más óptimo para el servicio.

Como ya se ha comentado en la fase del proyecto de puesta a punto, en primer lugar se realizó un proceso de carga sobre las nuevas baterías para dejarlas en estado óptimo para el funcionamiento para los ensayos en vacío.

Una vez realizadas las pruebas en vacío, fue necesario cargar las baterías del vehículo. Esta carga se realizó por medio del Smart Charger E48V 25A para baterías de plomo-ácido, cuyas características y funcionamiento se describen en el Anexo 2: Aparatos y dispositivos. El cargador se conectaba al vehículo a través del enchufe incorporado en el Zylog. Durante esta primera carga surgieron diversos contratiempos, en primer lugar el proceso duró más de lo esperado y tuvo que interrumpirse para finalizarse posteriormente en una segunda fase de carga. Además, el divisor de tensión de la sonda empleada para almacenar los datos del proceso en el registrador no fue lo suficientemente grande como para mantener en todo momento la tensión de entrada al dispositivo por debajo de los 2.5 V que admite. Esto hizo que tuviese que desconectarse y dejarse de medir el proceso por el posible riesgo de dañar el dispositivo. Por todo ello, únicamente se van a mostrar los resultados del segundo proceso de carga del Zylog, que sirvió para dejar el vehículo listo para la prueba de agotamiento de baterías tras realizar los ensayos con carga.

Durante el proceso de carga, la tensión y la intensidad evolucionaron de la siguiente manera:





Gráfica 61: Tensión e intensidad proceso de carga

Como podemos observar, el dispositivo comienza a cargar las baterías con una alta intensidad llegando hasta los 20 A. En esta primera fase de carga de alta intensidad, conforme la tensión de las baterías va aumentando, la intensidad del cargador va disminuyendo. Este proceso dura alrededor de tres horas y cuarto, y finaliza cuando se alcanza la tensión de gasificación.

Esta es la tensión a la que el electrolito comienza a hervir por la alta temperatura a la que se encuentra, producto de la reacción exotérmica que se está llevando a cabo en el interior de la batería. Llegados a este punto, el cargador comienza a aplicar pulsos con una amplitud desde 0 a aproximadamente 20 A para optimizar la duración y el proceso de carga. Tras 45 minutos aplicando pulsos, la tensión de las baterías había ascendido hasta casi los 61 V. Alcanzada esta tensión, el cargador dejó de alimentar las baterías y estuvo una hora sin aportar intensidad.

Pasado este tiempo, el cargador de nuevo aplicó un pico de intensidad y alimentó las baterías con una intensidad prácticamente constante de 12.3 A durante hora y media. Las baterías alcanzaron nuevamente una tensión de 61.5 V durante esta última fase hasta que finalmente el cargador indicó que el proceso de carga había finalizado.

## CAPÍTULO 6:

### CONCLUSIONES

---

El Zylog es un vehículo eléctrico pensado para aplicaciones de logística de distribución urbana, y su aptitud para este tipo de tareas ha quedado demostrada a lo largo de la elaboración del trabajo.

Se ha caracterizado el comportamiento del Zylog frente a factores muy influyentes a la hora de medir el nivel de exigencia al que se encuentra sometido un vehículo, como son la resistencia a la pendiente, la resistencia aerodinámica, y la resistencia de rodadura.

Las altas velocidades y sobre todo la resistencia a la pendiente, se ha visto que afectan en gran medida al consumo de estos vehículos, por lo que no son apropiados para este tipo de escenarios.

En cambio, dado que en los entornos urbanos lo común son rampas suaves y velocidades poco elevadas, este tipo de vehículos resulta idóneo para circular por ellos pudiendo realizar tareas como el reparto de mercancías. Además, como la carga transportada no es demasiado pesada, el vehículo es capaz de desempeñar su cometido sin ningún tipo de problema tal y como se ha visto en los ensayos.

A pesar de que la autonomía no es muy alta comparada con otros vehículos, ha quedado demostrado que su alcance es apto para llevar a cabo tareas de reparto urbanas, ya que las distancias recorridas no son excesivamente largas.

Por todo ello, vehículos como el Zylog o de características similares son adecuados para desempeñar este tipo de tareas.

Como aspectos a mejorar en este proyecto podría haberse realizado un protocolo de ensayos para obtener unos resultados más fiables y facilitar el análisis posterior de los resultados. Por otro lado, tras tarar el vehículo observamos que el peso de la carga utilizada para los ensayos, no era tan alto en comparación con el peso propio del vehículo. Una carga más alta habría puesto más en evidencia la influencia del peso trasladado en el comportamiento del vehículo.

Una posible continuación del proyecto es la realización de ensayos de muy larga duración para poder observar el límite de autonomía del vehículo. Sería interesante comparar esta autonomía con la obtenida de un ensayo idéntico, pero realizando pausas cada cierto tiempo, ya que se ha observado que en los tiempos de inactividad la baterías se regeneran levemente. De este modo, podría comprobarse si el hecho de realizar paradas intermedias aumentaría la autonomía del vehículo.

También se podrían llevar a cabo ensayos con cargas más pesadas para comprobar hasta qué punto la carga determina el comportamiento del vehículo. Por último, podrían recorrerse los diferentes circuitos a distintas velocidades para ver con mayor claridad cómo afecta la velocidad al consumo.

Para finalizar, a nivel de experiencia personal ha sido un trabajo muy interesante y atractivo ya que me ha ayudado a comprender el funcionamiento de los vehículos eléctricos. Con la elaboración del proyecto he tenido la oportunidad de desentrañar este tipo de vehículos y ver más de primera mano sus componentes y todo lo que esconden para finalmente acabar circulando. Además, el hecho de que haya sido un trabajo tan práctico y no tan teórico ha amenizado el tiempo dedicado y ha facilitado en gran medida la comprensión de todos los temas tratados.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] [https://es.wikipedia.org/wiki/Autom%C3%B3vil\\_el%C3%A9ctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Autom%C3%B3vil_el%C3%A9ctrico)
- [2] <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/baterias-y-vehiculo-electrico>
- [3] <http://objetivo2050.blogspot.com/2018/02/evolucion-del-precio-del-barril-de.html>
- [4] <http://electromovilidad.net/tipos-de-coches-electricos/>

# ANEXOS

## Anexo 1: CIRCUITOS

El Zylog es un vehículo eléctrico para aplicaciones de logística de distribución urbana. Por ello, los ensayos reales realizados tratan de simular diferentes escenarios frente a los que el vehículo podría enfrentarse durante las rutas de reparto.

Todos los ensayos han sido en realizados en el Campus Río Ebro. En la siguiente imagen se señala la zona del campus donde se encuentran los circuitos en los que se han realizado las pruebas experimentales.



*Ilustración 25: Emplazamiento de los circuitos*

Los tres circuitos en los que se han realizado los ensayos son:

- Circuito 1: Trayecto en recta. Realizado en el parking norte del Campus Río Ebro.
- Circuito 2: Trayecto en rampa. Realizado en la salida norte del Campus Río Ebro.
- Circuito 3: Trayecto con curvas. Realizado entre las naves de investigación del Campus Río Ebro.

En cada uno de ellos se ha tratado de poner el vehículo a prueba frente a un factor predominante diferente, para comprobar posteriormente cómo este afecta sobre el comportamiento del vehículo. A continuación, se expone una descripción más detallada de las características de cada uno de los circuitos.

- **Circuito 1: Trayecto en recta**

El primer circuito se trata de un parking rectangular de relativamente grandes dimensiones. En él se trata de simular el comportamiento del vehículo a velocidades más elevadas, lo que podría representar un escenario de carretera.



*Ilustración 36: Ubicación Circuito 1*



*Ilustración 27: Circuito 1, trayecto en recta*

El circuito se caracteriza por constar de dos rectas considerablemente más largas y un bajo número de curvas, lo que da lugar a una conducción simple y cómoda a lo largo del trayecto.

La distancia total recorrida en una vuelta al circuito es de aproximadamente 420 metros. Las dimensiones del parking son las siguientes:



*Ilustración 28: Dimensiones Circuito 1*

Por otro lado, entre el punto más bajo y el más alto del circuito existe un desnivel de 2 metros.



*Ilustración 29: Desnivel Circuito 1*

Como se puede observar en la Ilustración 29, los puntos de máxima y mínima altura coinciden con vértices opuestos del parking, y durante las rectas se asciende o desciende 1 m de altura aproximadamente. De este modo:

- En las rectas más largas, en 153 metros de longitud hay 1 metro de desnivel => Pendiente del 0.6536 %
- En las rectas más cortas, en 57 metros de longitud hay 1 metro de desnivel => Pendiente del 1.75 %



- **Circuito 2: Trayecto en rampa**

En segundo lugar encontramos el circuito en rampa, cuyo objetivo es observar el comportamiento del Zylog frente a una fuerte pendiente.



*Ilustración 30: Ubicación Circuito 2*



*Ilustración 31: Circuito 2, trayecto en rampa*

El recorrido consiste en un primer ascenso de la rampa para una vez se ha llegado arriba, realizar un cambio de sentido y llevar a cabo la bajada. El espacio total recorrido es de 490 metros.

A continuación, se muestran las dimensiones de cada uno de los tramos del circuito.

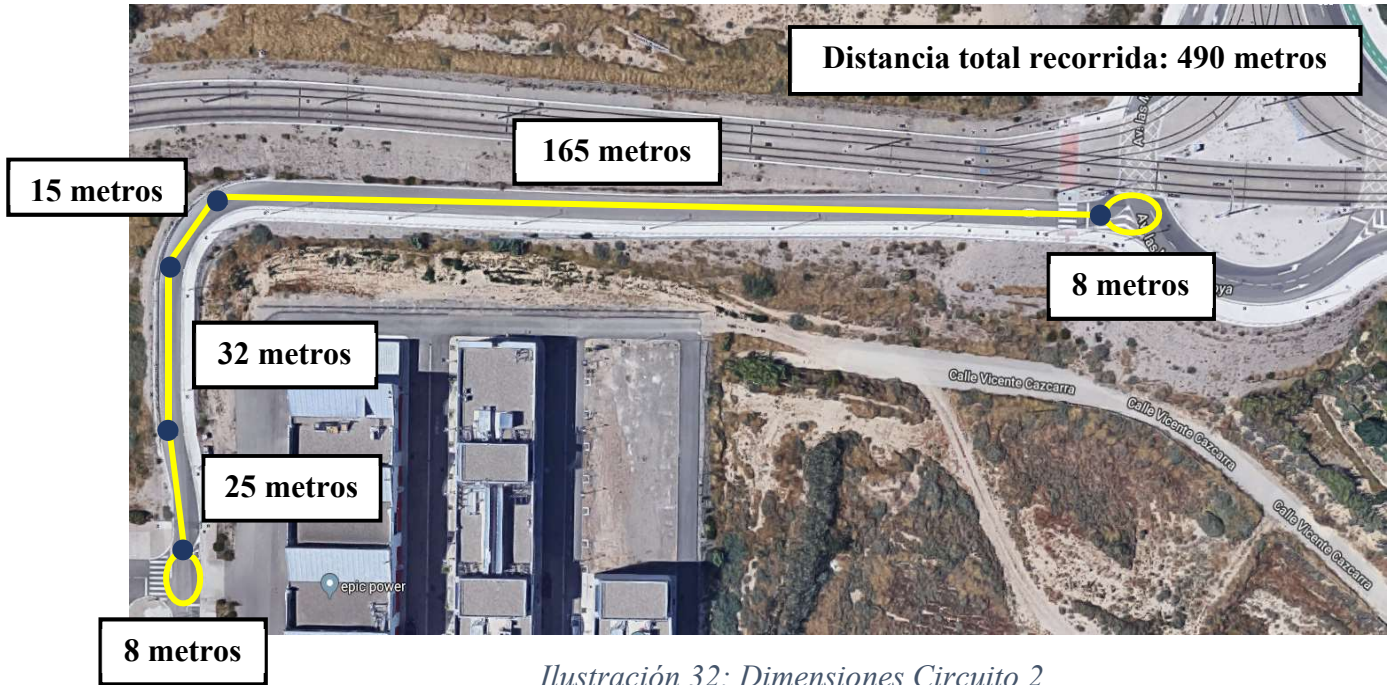


Ilustración 32: Dimensiones Circuito 2

El desnivel salvado en el circuito es aproximadamente de 13 metros.

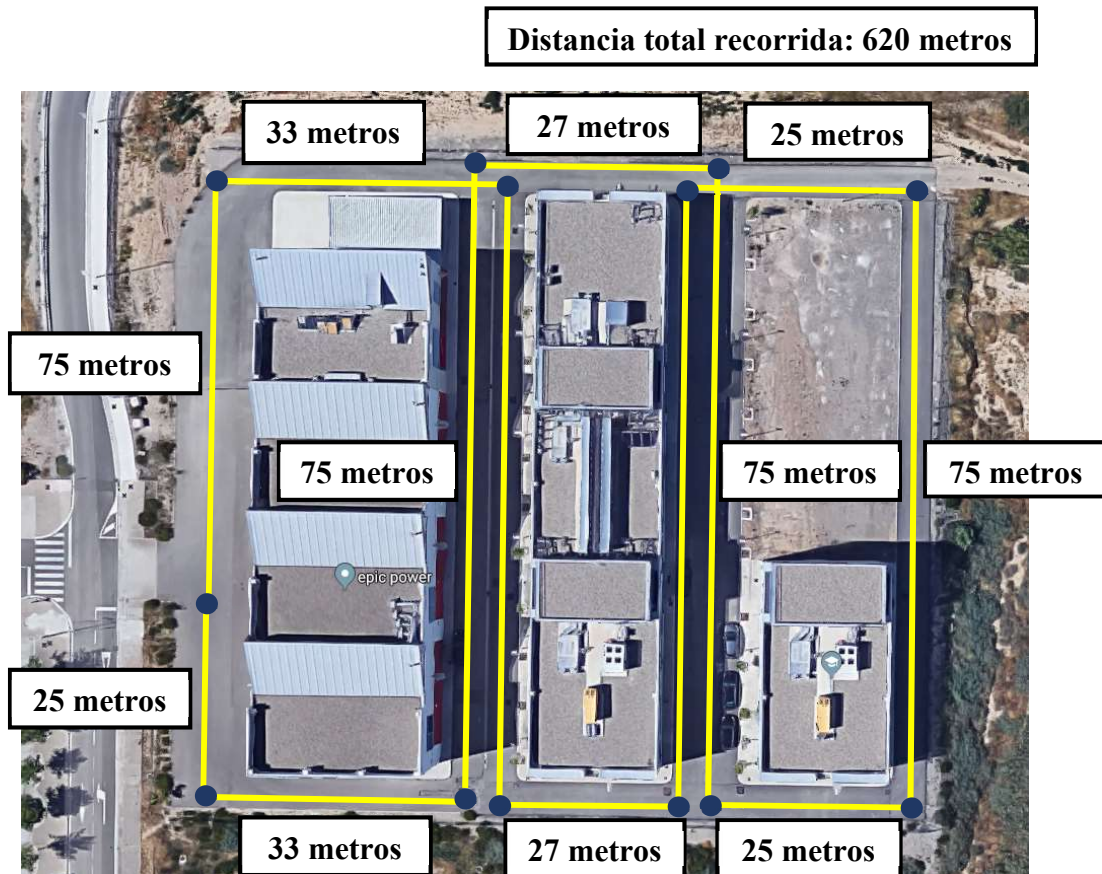


Ilustración 33: Desnivel Circuito 2



El recorrido consiste en bordear las naves de investigación haciendo “ochos”, por lo que se trata de un circuito con gran cantidad de curvas. Esto obliga al vehículo a variar continuamente su velocidad, frenando y acelerando en cada paso por curva. Además, las rectas no son de elevada longitud, lo que no permite al Zylog alcanzar altas velocidades. Estas características descritas son propias de un entorno urbano, en el que la conducción es mucho más irregular y se requiere de mayor atención al volante.

A continuación, se muestran las dimensiones de todos los tramos del circuito.



*Ilustración36: Dimensiones Circuito 3*

Por último, cabe mencionar que el desnivel del circuito es nulo, teniendo una altura constante respecto al nivel del mar de 202 metros.

## Anexo 2: APARATOS Y DISPOSITIVOS

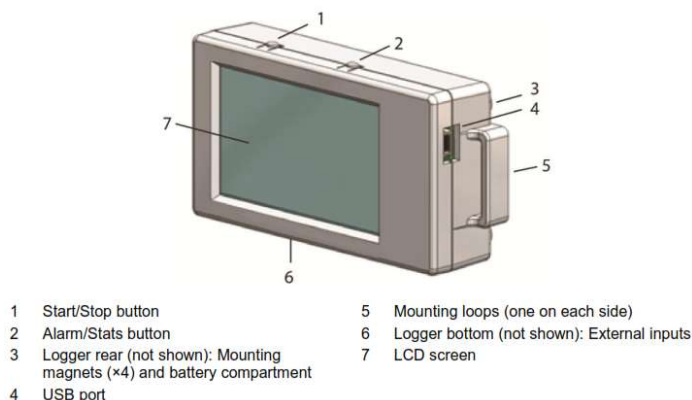
Para conocer bien el funcionamiento de los aparatos más relevantes utilizados a lo largo del proyecto, se va a realizar una descripción de sus características y de su metodología de uso. Los dispositivos empleados han sido principalmente el cargador del Zylog, un registrador de datos y un sensor de medida de intensidad. A continuación, se muestra un análisis detallado de cada uno de ellos.

### • Registrador USB-5106

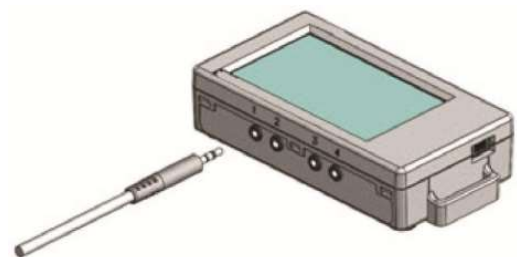
El dispositivo utilizado para la toma de datos durante los ensayos experimentales fue un registrador. Con este aparato y las sondas correspondientes, se recogieron todos los datos sobre la tensión y la intensidad de las baterías durante los ensayos realizados en los circuitos.

Se trata de un registrador modelo USB-5106. Cuenta con un software propio, el USB-5100 Series Data Logger Software, con el que puedes configurar el registrador para medir y analizar datos según diferentes criterios, como por ejemplo: variando la frecuencia, midiendo solo datos dentro de un intervalo determinado, programando alarmas...

Cuenta con 4 entradas analógicas y una pantalla LCD para la visualización de datos. A continuación, se muestra una imagen del aparato en la que se pueden diferenciar las diferentes partes y componentes del dispositivo.



*Ilustración 37: Partes del registrador USB-5106*

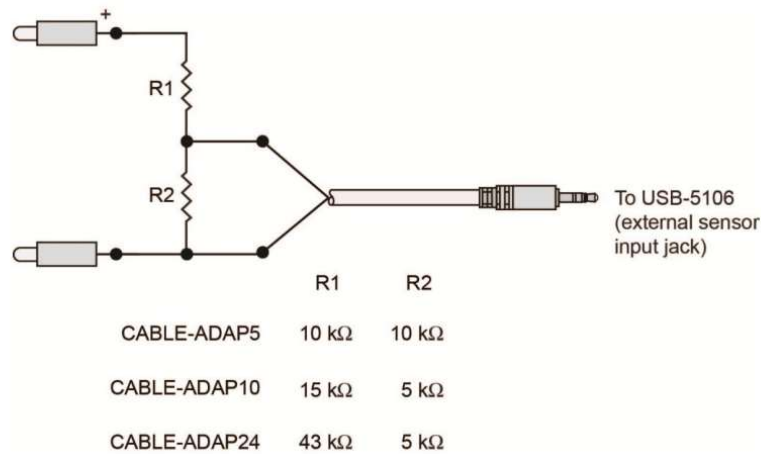


*Ilustración 38:  
Entradas de las sondas al dispositivo*

El registrador funciona gracias a dos pilas alcalinas AAA de 1.5 V que se pueden reemplazar en caso de agotamiento.

La información que llega al registrador, lo hace por medio de diferentes sondas conectadas a las entradas del dispositivo, Ilustración 38. Las sondas se han de conectar antes de que comience el registro de datos, y cada sonda ha de conectarse firmemente en la entrada que se ha programado en el software.

En nuestro caso, se va a hacer uso de sondas que se encargaran de adaptar la tensión de entrada al aparato. Esto se consigue por medio de un divisor de tensión. A continuación, se presenta un esquema eléctrico de este tipo de sondas con diferentes valores para las resistencias internas, según tres sondas propuestas por el fabricante:



*Ilustración 39:  
Sondas de adaptación de la tensión de entrada al dispositivo*


Las sondas que se han utilizado para el desarrollo del proyecto no son las originales, sino que están modificadas para adecuar la tensión de las baterías a la de entrada del dispositivo, limitada a 2.5 V. Para adaptar la sonda a nuestro caso particular, lo que se hizo fue añadir una tercera resistencia de modo que la tensión de salida que llega al registrador sea de menor magnitud.

Una vez hechas las pruebas y registrados los datos, se puede conectar el aparato por USB al ordenador para leer y analizar los datos registrados.

La sujeción del aparato al vehículo a la hora de realizar los ensayos prácticos se puede hacer de diferentes maneras utilizando los accesorios que vienen junto con el dispositivo: imanes en la parte trasera, cinta de doble cara, una correa sujeta a las asas laterales... En nuestro caso se optó por esta última opción.

Finalmente, a continuación se muestra una tabla de características del dispositivo.

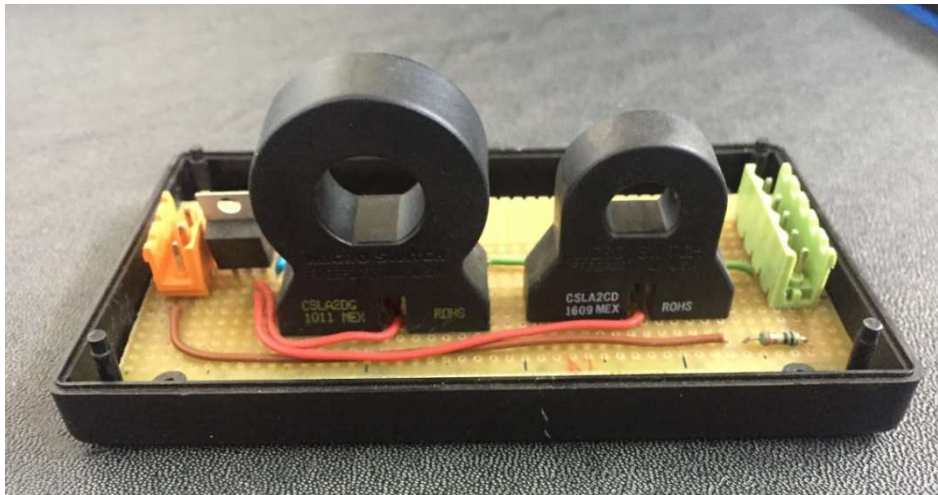
*Tabla 11: Especificaciones USB-5106 Logger*

<b>Parameter</b>	<b>Specification</b>
Operating range	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Logging: -20 °C to 70 °C (-4 °F to 158°F); 0 to 95% RH (non-condensing);</li> <li>■ Launch/Readout: 0 ° to 50°C (32 ° to 122 °F) per USB specification</li> </ul>
Logging rate	1 second to 18 hours, 12 minutes, 15 seconds
Logging modes	Normal, Burst, or Statistics
Memory modes	Wrap when full or stop when full
Start modes	Immediate, push button, date & time, or next interval
Stop modes	When memory full, push button, or date & time
Restart mode	Push button
Time accuracy	±1 minute per month at 25 °C (77 °F); refer to the Time Accuracy plot below
Resolution	16-bit
Battery life	1 year, typical with logging rate of 1 minute and a sampling interval of 15 seconds or greater
Battery type	Two AAA 1.5 V alkaline batteries, user replaceable
Memory	4 MB (1.9 million measurements, maximum)
Download type	USB 2.0 interface
Full memory download time	Approximately 1.5 minutes
LCD	LCD is visible from 0 °C to 50 °C (32 °F to 122 °F); the LCD may react slowly or go blank in temperatures outside this range
Size	10.8 × 5.41 × 2.54 cm (4.25 × 2.13 × 1 in.)
Weight	107.5 g (3.79 oz)
Environmental Rating	IP50
	The CE Marking identifies this product as complying with all relevant directives in the European Union (EU).

- **Sensor Hall**

Para analizar el comportamiento del vehículo y las baterías durante los ensayos experimentales en los diferentes circuitos, se utilizó un sensor Hall.

Este sensor se caracteriza por proporcionar un valor de tensión proporcional a la corriente que circula por el cable que estamos interesados en medir. Posteriormente, a través de la tensión obtenida, se puede conocer la corriente realizando los cálculos correspondientes según los parámetros del sensor. El sensor Hall en este caso está actuando como un sensor de corriente.



*Ilustración 40: Sensor Hall*

En la Ilustración 40 podemos observar dos de estos sensores sobre una placa de conexión. Se basan en un toroide por el que se hace pasar el cable sobre el que se quiere medir la corriente que circula. Sobre la placa también se pueden ver dos fichas, correspondientes a la alimentación del dispositivo y a la salida para la conexión de la sonda del registrador.

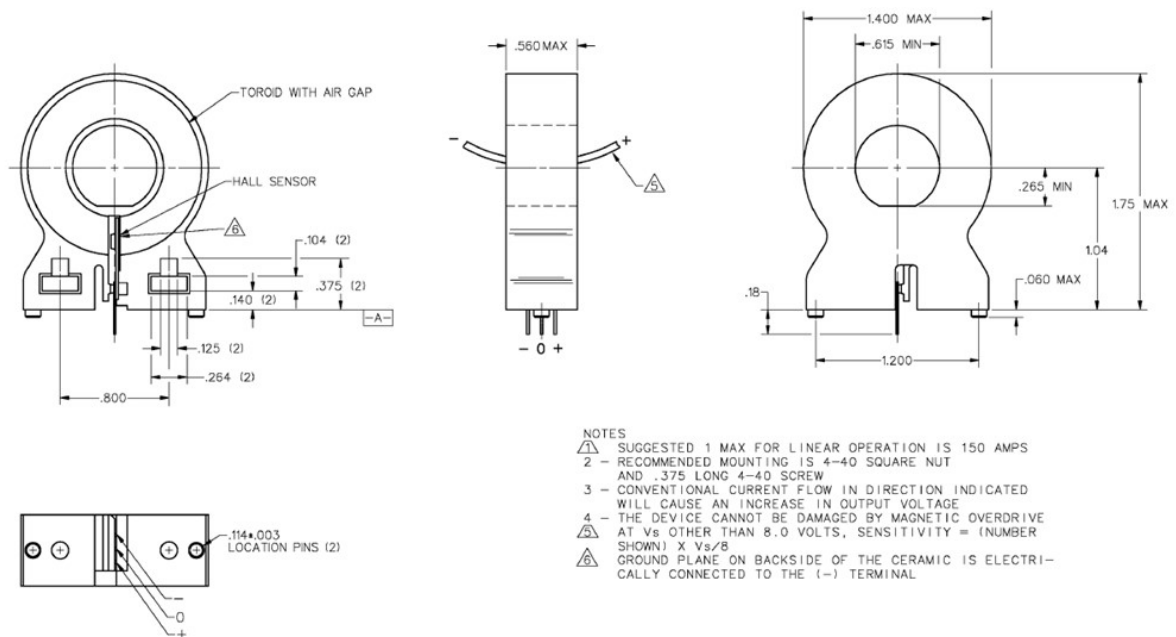
En nuestro caso, únicamente se utilizó uno de los sensores debido a la dificultad de conseguir hacer pasar los cables correspondientes por el interior de los toroides. Por ello, se decidió utilizar solamente el sensor de mayor tamaño de los dos, por el que se hizo pasar el conector de entrada a las baterías. En el esquema eléctrico del vehículo, el sensor se ubicó entre las baterías y el conmutador del enchufe del vehículo. De este modo, si el cargador no está enchufado, medimos la intensidad que circula entre las baterías y el motor/controlador. Por otro lado, si el cargador está conectado al enchufe, lo que pasamos a medir es la corriente de entrada a las baterías desde el cargador.





*Ilustración 41: Instalación sensor Hall en el Zylog*

A continuación, se muestra el plano del sensor y una tabla con sus características.



*Ilustración 42: Plano sensor Hall*

Tabla 12: Características sensor Hall

CHARACTERISTICS					
PARAMETER	MIN	TYP	MAX	UNITS	CONDITIONS/REMARKS
SUPPLY VOLTAGE	5.4		13.2	VOLTS	-25°C TO 85°C
SUPPLY CURRENT		8.0	20	mA	MAX @ -25°C, TYP @ 25°C, V <sub>S</sub> =8.0V, EXCLUDES LOAD
OUTPUT CURRENT	1	13		mA	SINKING OR SOURCING
OUTPUT VOLTAGE SWING	(-V)+1.25		(+V)-1.25	VOLTS	MAX CLAMPED @ 9.0 VOLTS MIN
SENSITIVITY	15.1		17.2	mV/A	@ V <sub>S</sub> =8.0V & 25°C $\frac{1}{5}$
LINEARITY		.5	1.0	% OF SPAN	DEV FROM STR LINE FROM -1 MAX TO +1 MAX $\frac{1}{1}$
V <sub>out</sub> @ $\emptyset$ NULL	.5(V <sub>S</sub> )-2%		.5(V <sub>S</sub> )+2%	VOLTS	25°C
TEMP ERROR-NULL	-.02		+.02	%/°C	-25°C TO 85°C
TEMP ERROR-GAIN	-.06		+.01	%/°C	-25°C TO 85°C

De esta tabla cabe destacar la sensibilidad del sensor, que está comprendida entre 15.1 y 17.2 mV/A. Esta sensibilidad es para una tensión de alimentación de 8 V. En nuestro caso, el sensor está alimentado a 9 V por lo que la sensibilidad cambia según las indicaciones de la nota 5 del plano, Ilustración 42.

También hay que remarcar que la tensión de salida del tensor cuando la corriente que atraviesa el toroide es 0 A, es igual a la mitad de la tensión de entrada más menos un 2%. El valor concreto de esta incertidumbre para el sensor utilizado se calculó experimentalmente comprobando la tensión de salida del sensor ante una tensión dada con corriente nula.

- **Cargador SMART CHARGER**

Para llevar a cabo el proceso de carga de las baterías del vehículo entre ensayo y ensayo se utilizó el cargador SMART CHARGER modelo E48V 25A para baterías de plomo-ácido, que trata de optimizar el proceso de carga y evitar la reducción de la vida de la batería.

Este cargador consta de un display LED en el que se indica el estado del proceso de carga. A continuación, se muestra una imagen del cargador en la que se aprecian las diferentes partes y componentes del mismo.



Ilustración 43: Partes y componentes SMART CHARGER

Respecto al proceso de carga, primeramente se conecta el cargador a la corriente eléctrica y posteriormente a las baterías. Automáticamente, el cargador se enciende transcurridos 8 segundos y se ilumina el LED “ON”, indicando que el proceso de carga ha comenzado.



*Ilustración 44: Inicio del proceso de carga*

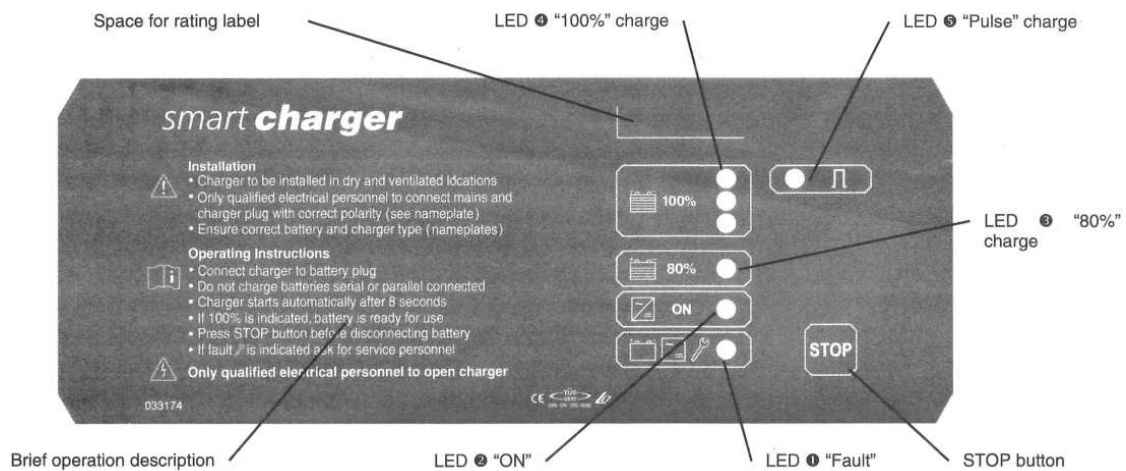
La carga de las baterías comienza con una intensidad muy alta. Conforme va avanzando el proceso de carga, debido a la reacción exotérmica que se produce, la temperatura del electrolito del interior de las baterías va ascendiendo hasta llegar a un punto en el que comienza a hervir y se empiezan a liberar partículas de hidrógeno. La tensión de las baterías cuando se alcanza este momento se denomina voltaje de gasificación.

Una vez se alcance el voltaje de gasificación, que dependerá de la batería, la temperatura... se enciende el LED “80%”. En este momento, se comienzan a aplicar pulsos para optimizar la duración y el proceso de carga, por lo que también se encenderá el LED correspondiente a “PULSE”.

Una vez la batería está cargada al 100%, se ilumina el LED “100%” indicativo de que el proceso de carga ha finalizado, y el cargador se apagará automáticamente.

Si la batería siguiese conectada al cargador una vez hubiese finalizado el proceso de carga, recibiría una carga de mantenimiento. Este proceso consiste en que el cargador se enciende durante 8 minutos cada 8 horas para darle a la batería la carga necesaria de modo que se compense la pérdida producida, manteniéndola al 100% del nivel de carga.

En la siguiente imagen se muestra un breve resumen de las instrucciones de operación y se señalan cada uno de los LEDs del display.



*Ilustración 45: Instrucciones y display del dispositivo*

La duración del proceso de carga depende de la tensión e intensidad de carga, la capacidad de la batería, el grado de descarga y de las condiciones de la batería como pueden ser la edad o la temperatura.

El tiempo de carga para una batería descargada un 80% y a una temperatura de 30° se muestra en la siguiente tabla en función de los parámetros comentados:

*Tabla 13: Tiempo medio de carga SMART CHARGER*

Charging voltage[V]	Charging current [A]	Average charging time 80% discharged battery	
		8.5 – 10h	10 – 12h
Battery capacity [Ah]			
36	20	150 – 180	181 – 210
36	25	181 – 210	211 - 240
36	30	211 - 240	241 - 280
48	20	150 – 180	181 – 210
48	25	181 – 210	211 - 240
48	30	211 - 240	241 - 280
72	25	181 – 210	211 - 240
72	30	211 - 240	241 - 280

En la siguiente tabla se encuentran las especificaciones para este tipo de cargadores. En ella se encuentra señalado el modelo utilizado para cargar las baterías del Zylog.

*Tabla 14: Especificaciones SMART CHARGER*

Model	Mains voltage	Rated power	Mains current	External mains fuse	Case	Weight
smart charger	VAC	kVA	A/Phase	A (Slow) (K)	Type	kg
36V 20A	230V	1.20	5.0	13	E 1	20
36V 25A	230V	1.40	6.1	13	E 1	24
36V 30A	230V	1.70	7.4	13	E 1	26
48V 20A	230V	1.40	6.1	13	E 1	31
48V 25A	230V	1.80	7.8	13	E 1	34
48V 30A	230V	2.20	9.5	13	E 1	48
72V 25A	230V	3.10	11.7	20	E2	57
72V 30A	230V	3.90	14.2	20	E2	61

Case type	H Height	W Width	D Depth	H0 Height	W0 Width
E1	259mm	411mm	262mm		385
E2	432mm	390mm	349mm	270	355