



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial

**MODELADO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE
ENERGÍA Y DEL CONTROLADOR DEL MOTOR
PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO *TESUR***

- Autor -

Adrián Paul Kurucz

- Tutores -

Dr. D. José Luis Blanco Claraco

Dr. D. Francisco Rodríguez Díaz

Almería, Septiembre 2014

*A mis padres, Pavel y Ana
y a mi hermano, Andrei.*

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han compartido conmigo estos últimos años y que procedo a citar a continuación como muestra de aprecio.

En primer lugar, a mis tutores José Luis y Paco, por su implicación y dedicación en este proyecto, sin los cuales no hubiera sido posible, y además por todo lo que he aprendido de ellos. También el profesor José Luis Torres merece una mención singular por los consejos, ánimo y apoyo que me brindó durante estos últimos meses de duro trabajo.

Quisiera además, tener un reconocimiento especial con mi compañero de laboratorio Curro, cuyos consejos fueron de gran utilidad y me dieron aliento en los momentos difíciles.

Y no puede faltar la gente que me ha acompañado en clase y en el trabajo durante este tiempo, aunque todos se merecen un hueco en estas líneas sólo nombraré a Juan Horacio, María, José, Cati, Cristian , la gente de Murcia y claramente a mis compañeros Miguel y Jero que se han ganado un hueco especial en mi vida.

Por último, destacar a las personas más cercanas a quienes debo mucho en esta vida, más importantes para mí, y a quienes dedico este proyecto: mis padres y mi hermano.

A todos, gracias.

Resumen

La situación energética actual y futura está condicionada por las limitadas reservas de combustibles fósiles, a lo que se suma la creciente preocupación por el medio ambiente y la eficiencia energética. Esta situación afecta especialmente al sector transportes, ya que es el mayor consumidor de energía.

Los vehículos eléctricos se presentan como una solución prometedora a los problemas con los que se enfrenta el sector del transporte. Pero estos a su vez están condicionados por la energía eléctrica disponible a bordo, es decir, por el estado de carga de las baterías (SOC). Este parámetro no es medible, por lo cual es necesario estimarlo basándose en las mediciones de otras señales disponibles en las baterías, tales como tensión, corriente y temperatura.

Este trabajo presenta un modelo eléctrico de las baterías, capaz de estimar el SOC, la tensión de las baterías y otros parámetros de interés a partir de la intensidad de descarga y la temperatura del electrolito de las baterías. Además, se ha realizado un estudio y análisis de tipos de baterías, centrándose en las baterías de Pb-ácido, sus características, modos de fallos, etc.

La energía disponible a bordo se debe utilizar de forma eficiente, por ello en este trabajo también se procede a la caracterización del controlador del motor de impulsión de un vehículo eléctrico en función de las consignas de aceleración.

Palabras clave: Vehículo autónomo, eficiencia energética, intensidad de descarga, capacidad, estado de carga, control motor de corriente continua.

Abstract

Current and future energy situation is conditioned by the limited reserves of fossil fuels, but also by a growing concern regarding environment preservation and energy efficiency. This especially affects the transport sector, which is the largest energy consumer.

Electric vehicles are presented as a promising solution to the problems that the transport sector is facing. But these in turn are conditioned by the power available on board, ie state charging (SOC) battery. This parameter is not measurable, so it is necessary to estimate it based on measurements of other signals available on the battery, such as voltage, current and temperature.

The present work introduces a battery electric model, capable of estimating the battery SOC, voltage and other parameters of interest from the discharge current and temperature of the battery electrolyte. Furthermore, an analysis of battery types, focused on Pb-acid batteries, their features and failure modes has been performed.

The energy available on board should be used efficiently, so in this work also proceeds to characterize the dc motor control of an electric vehicle based on the setpoints of throttle.

Keywords: Autonomous vehicle, energy efficiency, intensity discharge, capacity, state of charge, dc motor control.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Índice general	III
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XIII
Índice de siglas y acrónimos	XIV
Nomenclatura	XV

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 1

1.1. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO (TFG).....	1
1.2. OBJETIVOS DEL TFG	2
1.3. CONTEXTO.....	3
1.4. RESUMEN DE RESULTADOS	4
1.5. PLANIFICACIÓN DE LAS TAREAS	6
1.6. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	7

CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 9

2.1. BATERÍAS.....	9
--------------------	---

Índice general

2.1.1.	Introducción	9
2.1.2.	Definición y tipos.....	9
2.1.3.	Historia de las Baterías	10
2.1.4.	Principio de funcionamiento y Materiales.....	11
2.1.5.	Reacciones Químicas.....	13
2.1.5.1.	Reacciones químicas descarga	14
2.1.5.2.	Reacciones químicas carga.....	14
2.1.6.	Terminología	15
2.1.6.1.	Densidad del electrolito	15
2.1.6.2.	Gasificación.....	15
2.1.6.3.	Sulfatación	16
2.1.6.4.	Sobrecarga.....	16
2.1.6.5.	Autodescarga.....	16
2.1.6.6.	Vida útil	17
2.1.6.7.	Estado de carga (SOC).....	17
2.1.6.8.	Profundidad de descarga (DOC)	18
2.1.6.9.	Voltaje de celda	18
2.1.6.10.	Voltaje nominal	18
2.1.6.11.	Voltaje de circuito abierto (OCV)	18
2.1.6.12.	Intensidad	18
2.1.6.13.	Impedancia interna	19
2.1.6.14.	Capacidad nominal	19
2.1.6.15.	Eficacia (%).....	20
2.1.6.16.	Efecto de la temperatura	20
2.1.7.	Tipos de baterías de Pb-ácido	20
2.1.8.	Tipos de Fallos Baterías Pb-ácido [13].....	23

2.1.8.1.	Tipos de fallos de baterías de Pb-ácido (Inundada).....	23
2.1.8.2.	Tipos de fallos de baterías de Pb-ácido (VRLA).....	24
2.1.9.	Estándares para Pruebas de Baterías	25
2.1.9.1.	IEEE 450.....	25
2.1.9.2.	IEEE 1188	26
2.2.	CONTROLADOR <i>CURTIS</i>	27
2.2.1.	Introducción	27
2.2.2.	Conexiones	28
2.2.2.1.	Señales de baja potencia	28
2.2.2.2.	Conexiones de potencia	30
2.2.3.	Cableado del Controlador.....	30
2.2.4.	Ubicación en el proyecto.....	31
CAPÍTULO 3.	EL VEHÍCULO <i>eCARM</i>	33
3.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL.	33
3.2.	COMPONENTES HARDWARE.....	34
3.2.1.	Sistema de Control.	35
3.2.2.	Tarjetas de E/S.....	37
3.2.3.	Sensores.....	38
3.2.4.	Actuadores.....	41
3.2.5.	Diagrama de conexiones.....	42
3.1.	ARQUITECTURA SOFTWARE	42
3.1.1.	<i>OpenMORA</i>	43
3.1.2.	Módulos del <i>eCARM</i>	43

CAPÍTULO 4. ESTADO DEL ARTE	45
4.1. MODELADO DE LAS BATERÍAS.....	45
4.1.1. Introducción	45
4.1.2. Punto de Partida.....	45
4.1.3. Descripción del Modelo de las Baterías	47
4.1.4. Diagrama de Bloques del Modelo	48
4.1.5. Definición de Ecuaciones y Constantes.....	49
4.1.5.1. Fuente de tensión de la rama principal (E_m).....	49
4.1.5.2. Resistencia vista en los bornes R_0	49
4.1.5.3. Resistencia R_1 de la rama principal.....	49
4.1.5.4. Resistencia R_2 de la rama principal.....	50
4.1.5.5. Intensidad de la rama parásita I_{PN}	50
4.1.5.6. Ecuaciones diferenciales del modelo.	50
4.1.5.7. Ecuaciones algebraicas del modelo.....	51
4.1.5.8. Capacidad total de las baterías.	52
4.1.5.9. Estado de carga SOC y profundidad de carga DOC	53
4.1.6. Resultados de los Artículos.....	53
4.2. MODELADO DEL CONTROLADOR	56
4.2.1. Introducción	56
4.2.2. Modulación por ancho de pulsos en motores dc	56
4.2.3. Etapa de Potencia.....	57
4.2.4. Modo de Funcionamiento.....	58
CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	61

5.1.	ENSAYOS BATERÍAS	61
5.1.1.	Introducción	61
5.1.2.	Características de las Baterías a Ensayo	61
5.1.3.	Metodología y Procedimiento de ensayo	62
5.1.4.	Resultados de los Ensayos	65
5.1.4.1.	Ensayo realizado con 4V de consigna de pedal (ensayo 1)	65
5.1.4.2.	Ensayo realizado con 4.3V de consigna de pedal (ensayo 2)	70
5.1.4.3.	Ensayo realizado con 4.4V de consigna de pedal (ensayo 3)	74
5.1.4.1.	Ensayo realizado con 4.5V de consigna de pedal (ensayo 4)	78
5.1.5.	Conclusiones de los Ensayos.....	82
5.2.	ENSAYOS SOBRE EL CONTROLADOR.....	84
5.2.1.	Introducción	84
5.2.2.	Resultados de los ensayos.	84
CAPÍTULO 6. PARÁMETROS DEL MODELO. SIMULACIÓN		89
6.1.	PARÁMETROS Y SIMULACIÓN DEL MODELO DE LA BATERÍAS.....	89
6.1.1.1.	Simulación descarga ensayo 4V consigna de pedal	93
6.1.1.2.	Simulación descarga ensayo 4.3V consigna de pedal.....	94
6.1.1.3.	Simulación descarga ensayo 4.4V consigna de pedal.....	96
6.1.1.4.	Simulación descarga ensayo 4.5V consigna de pedal.....	97
6.1.1.1.	Simulación carga.	99
6.2.	CÁLCULO DE PARÁMETROS.	100
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....		105
7.1.	CONCLUSIONES.....	105

7.2. TRABAJOS FUTUROS.....	106
BIBLIOGRAFÍA	107

Índice de figuras

Figura 1.1-Modelo dinámico de un vehículo eléctrico	2
Figura 1.2-Vehículo eléctrico de la Universidad de Almería	3
Figura 1.3- Respuesta del modelo para una simulación 10A de descarga	5
Figura 1.3-Diagrama de Gantt con la distribución temporal.....	6
Figura 2.1- Estructura de una batería	12
Figura 2.2-Reacciones químicas en una batería de Pb-ácido.....	13
Figura 2.3-Conexiones baja potencia.....	28
Figura 2.4-Conexiones de alta potencia.....	30
Figura 2.5-Configuración estándar del cableado del controlador.....	31
Figura 3.1-Emplazamiento de los componentes.....	34
Figura 3.2-Ordenadores embarcados en el <i>eCARM</i>	35
Figura 3.3-Sistemas empotrados en el <i>eCARM</i>	36
<i>Figura 3.4-Controlador Curtis 1268-5403</i>	36
<i>Figura 3.5-Tarjetas de E/S en el eCARM</i>	37
Figura 3.6-Sensores en el <i>eCARM</i> (<i>IMU</i> y <i>GPS</i>)	38
Figura 3.7-Sensores en el <i>eCARM</i> (láser y cámaras)	39
Figura 3.8-Sensores en el <i>eCARM</i> (encoders).....	40
Figura 3.9- Sensores en el <i>eCARM</i> (amperímetros).....	40

Figura 3.10-Sensores en el <i>eCARM</i> (voltímetro y sensor de temperatura).....	41
Figura 3.11- Actuadores en el <i>eCARM</i>	41
Figura 3.12-Diagrama de conexiones de los componentes hardware del <i>eCARM</i>	42
Figura 4.1-Circuito equivalente simple.....	45
Figura 4.2-Modelo general de las baterías de Pb-ácido	46
Figura 4.3-Circuito equivalente	47
Figura 4.4-Diagrama de bloques del modelo dividido en subsistemas	48
Figura 4.5-Perfil de tensión y corriente para un régimen de descarga a intensidad constante	53
Figura 4.6-Parámetros batería 1.....	54
Figura 4.7-Resultados del modelo para la batería 1.....	54
Figura 4.8-Parámetros batería 2.....	55
Figura 4.9-Resultados del modelo para la batería 2.....	55
Figura 4.10-Parámetros característicos de la onda PWM	57
Figura 4.11-Representación esquemática del funcionamiento de un puente en H.....	58
Figura 4.12-Mapa de la aceleración proporcionada por el manual del controlador Curtis	59
Figura 5.1-Voltaje de las baterías transcurridos 45 minutos	63
Figura 5.2-Voltaje de las baterías transcurridos 3 horas.....	63
Figura 5.3-Voltaje de las baterías transcurridos 4 horas.....	63
Figura 5.4-Curvas del proceso de descarga de las baterías (ensayo 1).....	65
Figura 5.5-Voltaje baterías (ensayo 1)	66
Figura 5.6-Evolución de la temperatura durante la descarga (ensayo 1).....	67
Figura 5.7-Emplazamiento sensores de temperatura	67

Figura 5.8-Curvas del proceso de carga de las baterías (ensayo 1)	68
Figura 5.9- Evolución de la temperatura durante la carga (ensayo 1)	69
Figura 5.10- Curvas del proceso de descarga de las baterías (ensayo 2)	70
Figura 5.11- Evolución de la temperatura durante la descarga (ensayo 2).....	71
Figura 5.12- Curvas del proceso de carga de las baterías (ensayo 2)	72
Figura 5.13- Evolución de la temperatura durante la carga (ensayo 2).....	73
Figura 5.14- Curvas del proceso de descarga de las baterías (ensayo 3)	74
Figura 5.15- Evolución de la temperatura durante la descarga (ensayo 3).....	75
Figura 5.16- Curvas del proceso de carga de las baterías (ensayo 3)	76
Figura 5.17- Evolución de la temperatura durante la carga (ensayo 3).....	77
Figura 5.18- Curvas del proceso de descarga de las baterías (ensayo 4)	78
Figura 5.19-Voltaje baterías (ensayo 4).....	79
Figura 5.20- Evolución de la temperatura durante la descarga (ensayo 4).....	80
Figura 5.21- Curvas del proceso de carga de las baterías (ensayo 4)	81
Figura 5.22- Evolución de la temperatura durante la carga (ensayo 4).....	82
Figura 5.23-Ensayo Curtis modo de funcionamiento 1.....	85
Figura 5.24-Ensayo Curtis modo de funcionamiento 2.....	86
Figura 5.25- Trayecto recorrido en el ensayo por el recinto de la UAL.....	87
Figura 5.26-Salida de tensión del Curtis, ensayo trayectoria velocidad variable.....	87
Figura 6.1-Diagrama de bloques del modelo simplificado.....	91
Figura 6.2-Diagrama de bloques detallado del modelo implementado en simulación	92
Figura 6.3-Validación descarga ensayo 1	93

Figura 6.4-Salidas simulación-descarga ensayo 1	94
Figura 6.5-Validación descarga ensayo 2	95
Figura 6.6-Salidas simulación-descarga ensayo 2.....	95
Figura 6.7-Validación descarga ensayo 3	96
Figura 6.8-Salidas simulación-descarga ensayo 3.....	97
Figura 6.9-Validación descarga ensayo 4	98
Figura 6.10-Salidas simulación-descarga ensayo 4.....	98
Figura 6.11-Simulación de la tensión de carga..	99
Figura 6.12-Simulación de la tensión de carga.	100
Figura 6.13-Diagrama modelo controlador Curtis.	101
Figura 6.14-Salida del modelo identificación modo 1.....	101
Figura 6.15-Salida del modelo validación modo 1.....	102
Figura 6.16-Salida del modelo identificación modo 2.....	103
Figura 6.17-Salida del modelo validación modo 2.....	104

Índice de tablas

Tabla 1.1-Parámetros identificados para el modelo en simulación	4
Tabla 1.1-Resumen de tareas.....	7
Tabla 2.1- Pares electroquímicos.....	11
Tabla 2.2-Conector Sensor de velocidad J2.....	28
Tabla 2.3-Conector Lógico J1.....	29
Tabla 2.4-Conector Sensor de velocidad J3.....	30
Tabla 3.1-Características técnicas del vehículo <i>eCARM</i>	33
Tabla 3.2-Lista de componentes del vehículo <i>eCARM</i>	34
Tabla 3.3: Listado de módulos del <i>eCARM</i>	43
Tabla 5.1-Características de la batería <i>GreenSaver SP210-6(210Ah/5h)</i>	61
Tabla 5.2-Comportamiento térmico de los elementos del <i>eCARM</i>	62
Tabla 5.3-Resumen datos descarga de las baterías.....	83
Tabla 5.4-Resumen datos carga de las baterías.....	83
Tabla 6.1-Parámetros referentes a la capacidad de las baterías	90
Tabla 6.2-Parámetros referentes a la rama principal de las baterías.....	91
Tabla 6.3-Parámetros referentes a la rama parásita y al modelo térmico de las baterías	91

Índice de siglas y acrónimos

A: -Amperios., 48

AGM: -Absorbed Glass Matt, 9

Ah: -Amperios hora, 17

AWG: -American Wire Gauge, 26

C: -Culombios, 17

DOC: - Depth Of charge, 16

FEDER: -Fondo Europeo de Desarrollo Regional., 3

GND: -Tierra de la alimentación, 27

KSI: -KeySwitch Input, 27

OCV: -Open Circuit Voltage, 16

PRV: - Pressure Reducing Valve, 22

PWM: - Pulse Width Modulation, 54

Q: -Carga, 17

SOC: -State Of Charge, 15

TFG: -Trabajo Fin de Grado, 1

UAL: -Universidad de Almería, 36; -Universidad de Almería., 2

UPS: - Uninterruptible Power System, 21

V: -Voltios, 47

V2G: -Vehicle to Grid, 104

VRLA: -Valve Regulated Lead Acid, 9

Ω : -Ohmnios, 47

Nomenclatura

A_0	Constante del modelo., 45	-
A_{21}	Constante del modelo., 46	-
A_{22}	Constante del modelo., 46	-
A_p	Constante del modelo., 46	-
C_0^*	Capacidad nominal., 48	Ah
C_θ	Capacidad calorífica., 47	Julio/°C
E_m	Fuente de tensión de la rama principal., 45	V
E_{mo}	Tensión de circuito abierto a plena carga., 45	V
E_s	Fuente de tensión interna de la rama parásita., 48	V
G_{p0}	Constante del modelo., 46	s
I^*	Intensidad nominal o intensidad de trabajo., 46	A
I_1	Intensidad que recorre R_1 ., 47	A
I_m	Intensidad que recorre R_2 ., 46	A
I_{pN}	Intensidad de la rama parásita., 46	A
K_c	Constante del modelo., 48	-
K_e	Constante del modelo., 45	-
P_s	Potencia disipada en forma de calor., 47	Watio
Q_e	Carga eléctrica extraída/inyectada, 47	Ah
R_0	Resistencia vista en los bornes., 45	Ω
R_{00}	Constante del modelo., 45	-
R_1	Resistencia de la rama principal., 45	Ω
R_{10}	Constante del modelo., 45	-

Nomenclatura

R_2	Resistencia de la rama principal., 46	Ω
R_{20}	Constante del modelo., 46	-
R_θ	Resistencia térmica., 47	$^\circ\text{C}/\text{W}$
V_{AB}	Tensión en los bornes., 47	V
V_{p0}	Constante del modelo., 46	-
V_{PN}	Caída de tensión en la rama parásita., 46	-
θ_{amb}	Temperatura ambiente., 47	$^\circ\text{C}$
θ_f	Temperatura de congelación del electrolito., 46	$^\circ\text{C}$
τ_1	Constante de tiempo de la rama principal., 47	s
DOC	Profundidad de carga., 45	%
I	Intensidad de descarga/carga de las baterías., 48	A
SOC	Estado de carga., 45	%
δ	Constante del modelo., 48	-
ε	Constante del modelo., 48	-
θ	Temperatura de las baterías., 45	-
ρ	Densidad., 11	Kg/dm^3

**Modelado del sistema de
almacenamiento de energía y
del controlador del motor para
un vehículo eléctrico *Tesur***

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO (TFG)

Las sociedades actuales están caracterizadas por un crecimiento espectacular de la movilidad física. Esto da lugar a rápidas e intensas transformaciones funcionales y estructurales, y como consecuencia de ello se está produciendo un aumento progresivo del uso del coche en detrimento del transporte público [1].

Por ello, son necesarios vehículos con mejores sistemas de seguridad y con un mejor aprovechamiento y optimización del consumo energético. Seguridad, eficiencia energética y reducción de emisiones por parte del sector del transporte son factores clave en la sociedad de hoy en día. Ante esta cuestión, surge como respuesta el desarrollo de vehículos eléctricos autónomos por las ventajas que presentan [2], destacando:

- Reducción del número de accidentes, debido a que los sistemas autónomos incrementan la seguridad respecto a los conductores humanos.
- Mejora de la capacidad de las carreteras, ya que se puede disminuir la distancia de seguridad y gestionar el tráfico de forma más eficiente.
- Optimización de la ruta, debido a que son capaces de encontrar el camino más rápido para ir de un lugar a otro incluso con mucho tránsito, lo cual es un ahorro de tiempo y dinero.
- Elimina la necesidad de un conductor, por lo que el vehículo gana una plaza que puede ser ocupada sin ninguna restricción (por edad, discapacidad...).
- Aliviaría la escasez de aparcamiento, ya que el vehículo dejaría a los pasajeros y luego seguiría solo hacia un lugar donde pudiera aparcar, de la misma forma que luego podría volver y recoger a los pasajeros donde ellos quisieran.

En el proceso de desarrollo de estos vehículos, y también posteriormente, es de suma importancia contar con un modelo que represente el comportamiento del sistema de alimentación de manera adecuada, para conocer las limitaciones energéticas en función del régimen de descarga.

En respuesta a esa necesidad surge este TFG. Trabajo que pretende conseguir un modelo que permita caracterizar las principales funciones y prestaciones del vehículo eléctrico, necesarias para los avances en las técnicas de control automático, eficiencia energética,... implicadas en el desarrollo de un vehículo eléctrico autónomo.

1.2. OBJETIVOS DEL TFG

Este proyecto tiene como objetivo principal el modelado del subsistema eléctrico del prototipo de vehículo eléctrico *eCARM* de la Universidad de Almería (UAL), correspondiente al sistema de alimentación formado por el conjunto de baterías que suministran la energía necesaria en función de sus parámetros característicos intensidad, voltaje, capacidad, etc. Asimismo, se determinará un modelo experimental, tipo "caja negra", para el controlador comercial del motor. Dicho modelo servirá para posteriormente integrarse en un modelo dinámico, figura 1.1, que refleje el comportamiento del vehículo eléctrico.

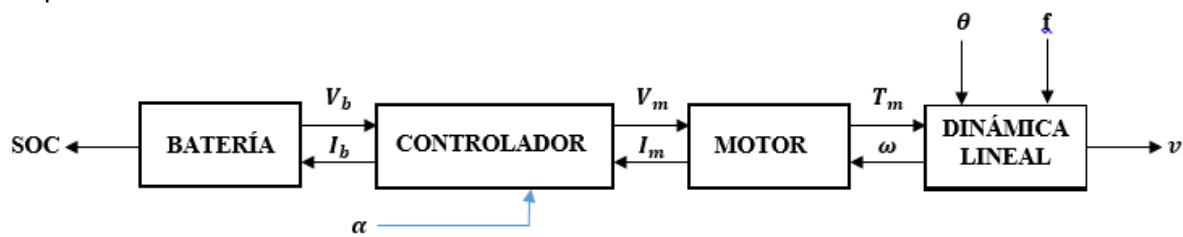


Figura 1.1-Modelo dinámico de un vehículo eléctrico

Los parámetros del modelo se obtienen a partir de ciclos experimentales de descargas que constan de periodos de descarga a corriente constante intercalados con otros en los cuales la batería está en reposo. El modelo del acumulador, con los parámetros obtenidos, presenta una precisión suficiente para evaluar el estado de carga y la evolución de la tensión en los bornes de las baterías. Dicha evaluación se lleva a cabo mediante la implementación del modelo en *Simulink/Matlab*. Por otro lado, el modelo del controlador permitirá conocer el comportamiento del vehículo frente a las consignas de aceleración, permitiendo de esta manera cuantificar en una primera instancia la demanda energética del vehículo en cada instante.

Para la identificación de los parámetros del modelo, se habrá de cumplir los siguientes objetivos parciales:

- Instalar y calibrar los elementos de medición y actuación que permita la realización de los ensayos necesarios.
- Establecer el modelo matemático aproximado que se ajuste al comportamiento del sistema.
- Identificar y ajustar los parámetros del modelo en base a los datos obtenidos en los ensayos.
- Implementar el modelo en simulación.
- Validar y analizar las particularidades del modelo obtenido.

Del proceso de identificación cabe señalar que, por un lado tenemos parámetros que son directamente dependientes de otras magnitudes, y por otro lado, tenemos parámetros no medibles, por lo cual es necesario estimarlos en base a mediciones de otras señales disponibles, tales como tensión, corriente, temperatura,...

1.3. CONTEXTO

El presente Trabajo Fin de Grado supone para su autor la culminación de los estudios de Grado en Ingeniería Electrónica Industrial por la Universidad de Almería, cursados en el período comprendido entre 2010 y 2014. Se trata de una de las propuestas ofrecida por el Grupo de Investigación TEP-197 *Automática, Robótica y Mecatrónica* bajo el marco del proyecto "Estrategias de control y supervisión para la gestión integrada de instalaciones en entornos energéticamente eficientes" (DPI2010-21589-C05-C04), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Como ya se ha mencionado, la UAL dispone de un vehículo eléctrico urbano *Greenland* modelo *LITA GLe2-2S* [3], bautizado como *eCARM* (figura 1.2), presente en algunas líneas de investigación del grupo ARM. Uno de los intereses principales es su uso para el estudio de la eficiencia energética en vehículos eléctricos [4].



Figura 1.2-Vehículo eléctrico de la Universidad de Almería

Partiendo del equipamiento básico de un vehículo convencional, se ha dotado al *eCARM* con la instrumentación necesaria, que se detallará en el capítulo 3, para convertirlo en un vehículo autónomo. Además del abanico de posibilidades que esto ofrece (TFG, tesis, artículos...), sería posible emplearlo el futuro en experimentos relacionados con otros campos, ya que aumentaría la reproducibilidad de los mismos al eliminar la aleatoriedad que conlleva un conductor humano.

1.4. RESUMEN DE RESULTADOS

Se ha realizado un estudio y un análisis de los distintos tipos de baterías, centrándonos en las baterías de Pb-ácido, sus características y parámetros específicos.

La intención de esto es proporcionar una base de conocimientos respecto al principio de funcionamiento eléctrico-químico de las mismas, para proponer un modelo teórico de las mismas que se ajuste al comportamiento de las baterías del vehículo eléctrico eCARM. De esta forma es posible: por un lado, predecir los valores de tensión y estado de carga y con ello definir los límites energéticos del vehículo; por otro, simular el comportamiento de las baterías frente a diferentes regímenes de descarga.

La implementación de la simulación del modelo se realiza en Matlab/Simulink, dicho modelo se debe configurar mediante una serie de parámetros que permita emular el comportamiento de una batería real. En la Tabla 1.1 se resumen los parámetros identificados en este trabajo obtenidos para las baterías de Pb-ácido en estudio.

Tabla 1.1-Parámetros identificados para el modelo en simulación

K_c	$C_0^* [Ah]$	ε	δ	$I^* [A]$	$\theta_f [^{\circ}C]$			
1.4310	117.2595	0.3652	1.5153	14	-38.0140			
$E_{mo} [V]$	K_E	$R_{00} [\Omega]$	$R_{10} [\Omega]$	A_0	$R_{20} [\Omega]$	A_{21}	A_{22}	$\tau_1 [s]$
45.2	0.013	0.021	0.032	-0.593	0.754	-7.56	-8.15	1550.86
$E_p [V]$	V_{p0}		A_p	$R_{\theta} [^{\circ}C/Watio]$	$C_{\theta} [J/^{\circ}C]$			
1.5	0.1051		2.08	1.12	13300			

Con dicha configuración de parámetros del modelo se realiza una simulación de una descarga a 10A y temperatura ambiente constante de 28.6°C, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 1.3. El régimen de descarga constante proporciona una salida de carga extraída perfectamente lineal. Por otro lado, los valores de SOC y DOC, proporcionan información relativa a la cantidad de energía disponible en las baterías. La gráfica de temperatura proporciona información referente al aumento de temperatura de las baterías debido a la potencia disipada en forma de calor.

Por último, tenemos el valor simulado de tensión en los bornes de las baterías, donde al inicio tenemos un pequeño escalón representativo de la iniciación de la descarga y al final del ensayo tenemos la curva de recuperación típica de una batería.

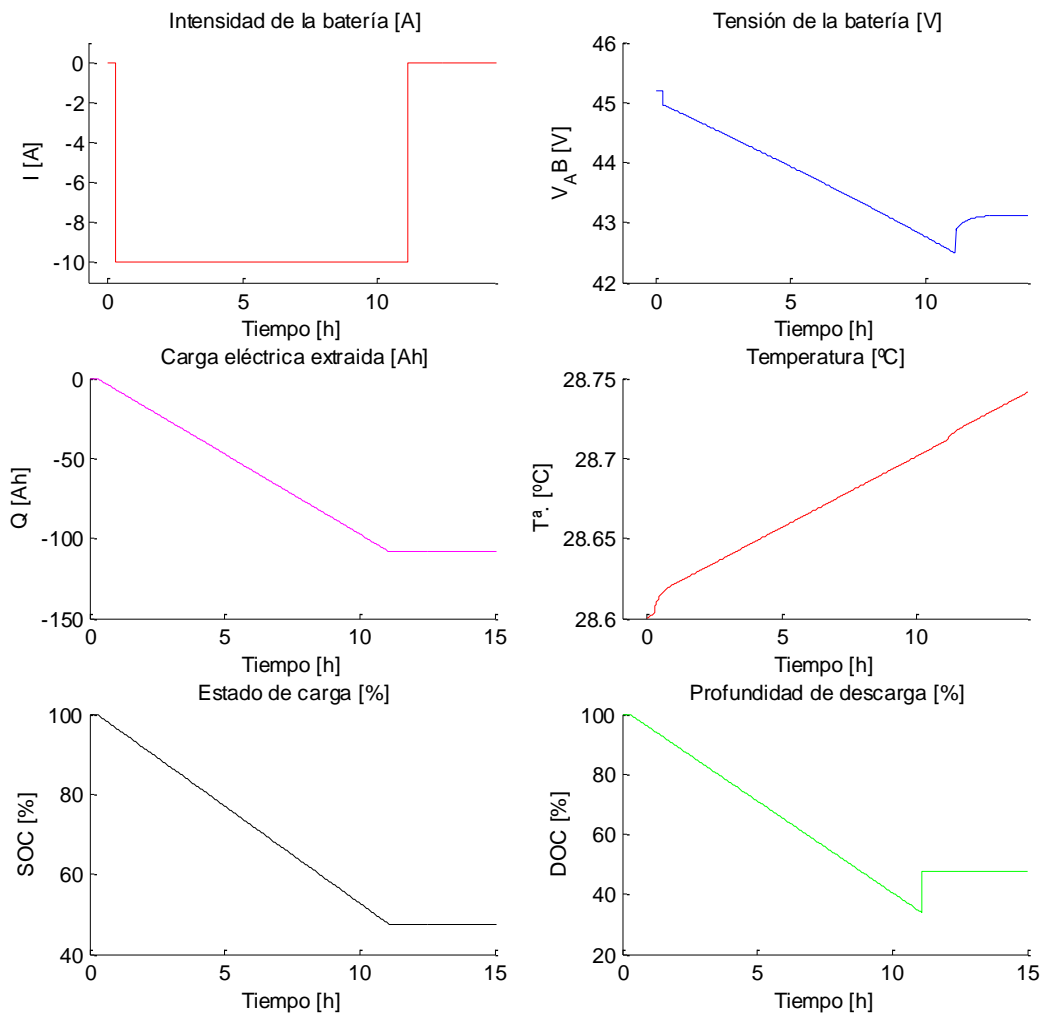


Figura 1.3- Respuesta del modelo para una simulación 10A de descarga

También se ha llevado a cabo una investigación sobre el sistema encargado de relacionar la parte lógica de señales de baja potencia con la parte de potencia que pone en movimiento al vehículo, correspondiente a un controlador *Curtis*. El comportamiento del voltaje suministrado al motor en función de la consigna dada por el pedal de aceleración se define como un sistema no lineal representado por una función de primer orden cuya ganancia y constante de tiempo varían según la dinámica dada por las ecuaciones (1.1) y (1.2) respectivamente, para dos intervalos posibles de funcionamiento.

$$K_i = p_{1i} u(t)^4 + p_{2i} u(t)^3 + p_{3i} u(t)^2 + p_{4i} u(t) + q \quad (1.1)$$

$$\tau_i = m u(t) + n \quad (1.2)$$

1.5. PLANIFICACIÓN DE LAS TAREAS

Para llevar a cabo este trabajo se ha seguido una secuencia de tareas que se describen a continuación, incluyendo un diagrama de Gantt [5] en el que se muestra su distribución temporal **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y una abla resumen Tabla 1.2.

- **Tarea 1: Estudio del funcionamiento y tipos de baterías.** Se basa la comprensión del principio básico de funcionamiento de las baterías y la clasificación en función del uso de las mismas.
- **Tarea 2: Determinación del estado del vehículo.** Comprende un análisis de los sensores y actuadores de los que dispone el eCARM para determinar la posibilidad de utilización de los mismos, así como la determinación de otros dispositivos necesarios para cumplir los objetivos establecidos.

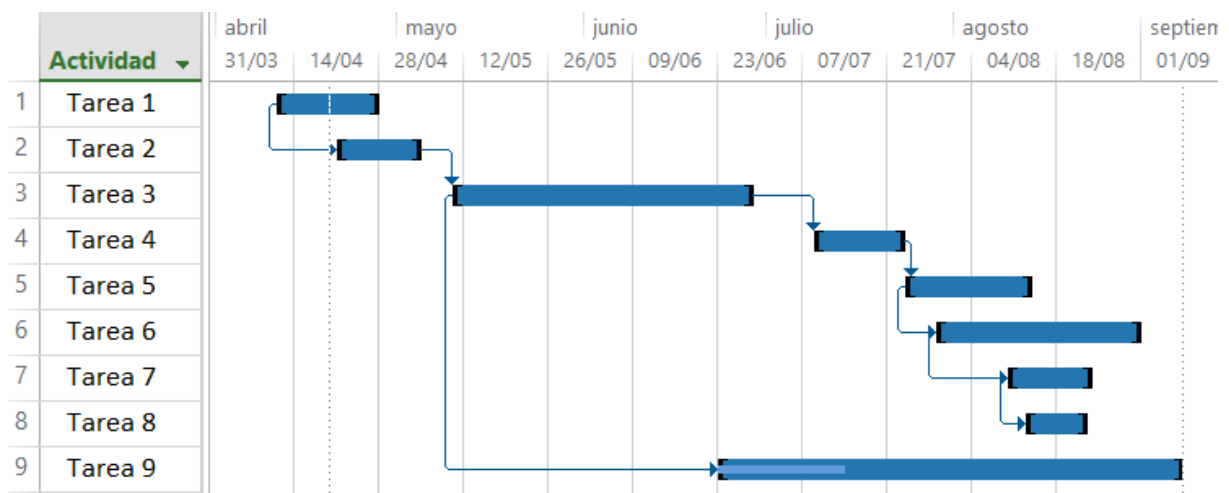


Figura 1.4-Diagrama de Gantt con la distribución temporal

- **Tarea 3: Búsqueda de información.** Trata principalmente de la búsqueda bibliográfica sobre trabajos relacionados con la estimación del estado de carga de las baterías y sobre el control de la energía extraída de las baterías. Complementado la búsqueda con la revisión de fichas técnicas la instrumentación del vehículo, manuales de uso y documentación que justifique la ejecución de este proyecto.
- **Tarea 4: Determinación del procedimiento de los ensayos.** Incluye el acondicionamiento y calibración de todos los sistemas de medida y pruebas preliminares con el objetivo de determinar el procedimiento a realizar para obtener los datos necesarios con los que ajustar el modelo.
- **Tarea 5: Puesta en práctica y recogida de datos.** Establecidos los pasos a seguir, se procede a realizar los ensayos establecidos con vista a obtener los datos necesarios para la determinación y caracterización de los modelos buscados.

- **Tarea 6: Tratamiento de los datos e identificación de parámetros.** Radica en la valoración de los datos obtenidos, formulación de las ecuaciones y del método de identificación que permite la determinación de los parámetros que describen el modelo.
- **Tarea 7: Simulación de los modelos y simplificaciones del mismo.** Radica en la implementación de las ecuaciones que definen el funcionamiento o en su caso comportamiento, e implementación de simplificaciones en el caso de que estas se puedan poner en práctica y ajuste de los parámetros en función de los resultados obtenidos en los ensayos.
- **Tarea 8: Validación de los modelos obtenidos y conclusiones.** Realizados los ajustes se procede a la validación de los modelos implementados en Matlab/Simulink. Con el correspondiente análisis de los resultados.

Tabla 1.2-Resumen de tareas

Actividad	Duración	Comienzo	Fin
Tarea 1	17 días	vie 11/04/14	lun 28/04/14
Tarea 2	14 días	lun 21/04/14	lun 05/05/14
Tarea 3	50 días	sáb 10/05/14	dom 29/06/14
Tarea 4	15 días	mié 09/07/14	jue 24/07/14
Tarea 5	21 días	jue 24/07/14	jue 14/08/14
Tarea 6	34 días	mar 29/07/14	lun 01/09/14
Tarea 7	14 días	dom 10/08/14	dom 24/08/14
Tarea 8	10 días	mié 13/08/14	sáb 23/08/14
Tarea 9	77 días	lun 23/06/14	lun 08/09/14

- **Tarea 9: Redacción de memoria.** Elaboración del presente documento, que recopila en detalle la revisión bibliográfica, el material y la metodología aplicada, los resultados obtenidos, conclusiones y trabajos futuros.

1.6. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

La presente memoria se ha estructurado en siete capítulos cuyo contenido se resume a continuación: el capítulo 2 es un estudio y análisis de conceptos importantes para la comprensión de este trabajo; el capítulo 3 hace referencia al material y funcionalidades que presenta el vehículo hasta la fecha; el capítulo 4 se desarrolla el modelo matemático y las bases teóricas de este trabajo; en los capítulos 5 y 6 se presentan los resultados obtenidos y la identificación de los parámetros que definen cada uno de los modelos; y para terminar, en el capítulo 7 se redactan las conclusiones extraídas de este estudio y se proponen posibles trabajos futuros para continuar esta línea de investigación.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. BATERÍAS

2.1.1. INTRODUCCIÓN

La electricidad hoy en día tiene innumerables aplicaciones, esto es debido a la facilidad con que se transforma en otras formas de energía, como mecánica, química o térmica.

El principal suministro de energía eléctrica se realiza a través de la red eléctrica. Sin embargo, hay muchas ocasiones en las que se necesita disponer de energía eléctrica sin poder adquirirla de la red eléctrica.

Uno de los principales problemas de la energía eléctrica es la dificultad a la hora de su almacenamiento. Las baterías son una de las formas de almacenar la energía eléctrica, es decir, nos permite disponer de energía eléctrica cuando deseemos sin depender de la red.

En los siguientes apartados de este capítulo se realiza una descripción del principio de funcionamiento, de los diferentes tipos de baterías y de la terminología adoptada con el objetivo de obtener un modelo eléctrico de las mismas.

2.1.2. DEFINICIÓN Y TIPOS

Con el término pila, en castellano, se suele denominar a los generadores de electricidad no recargables, cuya carga no puede renovarse cuando se agota, excepto reponiendo las sustancias químicas de que está compuesta. Son formalmente conocidos como *pilas primarias*.

Se le denomina batería, batería eléctrica, acumulador eléctrico o simplemente acumulador, al dispositivo que almacena energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces. Se trata de *pilas secundarias*; es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga. [6]

El campo de aplicación de las pilas primarias se enmarca fundamentalmente dentro de las potencias bajas y de ahí que sean generalmente de tamaño pequeño.

Las pilas secundarias se comercializan en un amplio margen de capacidades, desde capacidades bajas (algunos cientos de miliamperios-hora) hasta capacidades medias y altas (varias decenas o centenas de amperios-hora).

2.1.3. HISTORIA DE LAS BATERÍAS

La batería de Pb-ácido, tal como la utilizamos en la actualidad, es el fruto de las investigaciones y el desarrollo de muchos científicos e ingenieros en el campo de la electroquímica.

En 1780, Luigi Galvani, amigo de Volta y científico como él, afirmó haber producido una corriente eléctrica poniendo en contacto dos metales diferentes con el músculo de una rana. Galvani envió un informe de su descubrimiento a Volta, quien argumentó que el músculo de la rana sólo conducía la corriente, y que ésta era producida por los propios metales. [7]

En 1800, Volta, profesor de filosofía natural en la Universidad de Pavía, demostró el funcionamiento de su batería eléctrica, o pila voltaica, consistente en láminas de plata y cinc separadas por ácido sulfúrico diluido, que producía una corriente eléctrica.

Al año siguiente Volta repitió la demostración en París delante de Napoleón Bonaparte, quien le nombró conde. Más tarde, la unidad de fuerza electromotriz recibió el nombre de voltio, en su honor.

A pesar de lo interesantes que pudieran parecer estos fenómenos, no se encontraba demasiada utilidad a este tipo de dispositivo de almacenamiento. En efecto, para cargarlo se debían utilizar celdas del mismo tipo o celdas primarias (pilas o celdas no reversibles). No se debe olvidar que todavía no se habían inventado las máquinas eléctricas.

Otros experimentadores incursionaron en este campo, pero fue un científico francés de 26 años, Gastón Planté, el primero en desarrollar un dispositivo que sentó en 1860 las bases de la celda de Pb-ácido, tal como la conocemos hoy en día.

Además, Planté descubrió que la capacidad de almacenamiento de las celdas se incrementaba sustancialmente cuando se les sometía al proceso que conocemos como "formación" y que, hoy en día, es parte del proceso de producción de cualquier acumulador electroquímico.

En el año 1881, el científico francés Faure realizó otro gran avance patentando un proceso para empastar la superficie de las placas con un compuesto de plomo que se transformaba con mucha facilidad en los materiales activos de la batería terminada, incrementando así la capacidad. [8]

El desarrollo en los últimos años de nuevas aplicaciones (vehículos eléctricos, sistemas fotovoltaicos, sistemas de alimentación ininterrumpida, etc.) han propiciado el uso extensivo de las baterías y con ello el desarrollo de nuevas tecnologías de baterías, cada vez más eficientes y fiables. Sin embargo, necesitan evolucionar aún más para ganar completamente la partida a los combustibles fósiles en el campo de la automoción.

2.1.4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y MATERIALES

El mecanismo que permite la utilización de una batería como una fuente portátil de energía eléctrica es una doble conversión de energía, llevada a cabo mediante el uso de un proceso electro-químico. La primera conversión, energía eléctrica en energía química, tiene lugar durante el proceso de carga. La segunda, energía química en eléctrica, ocurre cuando la batería es descargada. Para que estas conversiones puedan llevarse a cabo se necesitan dos electrodos metálicos, un ánodo y un cátodo, inmersos en un medio que los vincule, llamado electrólito.

Los tipos de electrólito son variados, desde soluciones acuosas hasta geles. La disolución acuosa tiene una aplicación reducida o inexistente en el caso de vehículos híbridos, siendo las baterías VRLA (Valve Regulated Lead Acid) o AGM (Absorbed Glass Matt) las más utilizadas. En ambos casos el objetivo es evitar la pérdida de electrólito, que afectaría negativamente al funcionamiento de la batería. (Ver apartado 2.1.7).

Los materiales activos se definen como pares electroquímicos. Este significa que uno de los materiales activos, el polo positivo o ánodo, es deficiente en electrones; el otro material activo, el polo negativo o cátodo, es rico en electrones. Los materiales activos son generalmente sólidos (plomo-ácido), pero pueden ser líquidos (sodio-azufre) o (zinc-aire, de aluminio-aire) gaseoso. La tabla 2.1 da una comparación instantánea de algunos de estos elementos. [7]

Tabla 2.1- Pares electroquímicos

Elemento	Reacción de los electrodos	Potencial de reducción
<i>Li</i>	$Li^+ + e^- \rightleftharpoons Li$	+3.045
<i>Na</i>	$Na^+ + e^- \rightleftharpoons Na$	+2.714
<i>Ca</i>	$Ca^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons Ca$	+2.87
<i>Zn</i>	$Zn^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons Zn$	+0.763
<i>Fe</i>	$Fe^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons Fe$	+0.44
<i>Ni</i>	$Ni^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons Ni$	+0.246
<i>Pb</i>	$Pb^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons Pb$	+0.126
<i>Cu</i>	$Cu^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons Cu$	-0.337
<i>Hg</i>	$Hg^{+2} + 2e^- \rightleftharpoons Hg$	-0.854
<i>Ag</i>	$Ag^+ + e^- \rightleftharpoons Ag$	-0.7995
<i>Au</i>	$Au^{+3} + 3e^- \rightleftharpoons Au$	-1.68
<i>F</i>	$F_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2F^-$	-2.87
<i>Cl</i>	$Cl_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Cl^-$	-1.36

La figura 2.1 muestra la estructura interna y externa de una batería de Pb-ácido, donde se observa la conexión en serie de las celdas, las cuales están físicamente separadas por particiones dentro de la caja que las contiene. Cada celda está compuesta de varias placas positivas y negativas, las cuales tienen separadores intermedios. Todas las placas de igual polaridad, dentro de una celda, están conectadas en paralelo. El uso de varias placas de igual polaridad permite aumentar la superficie activa de una celda.

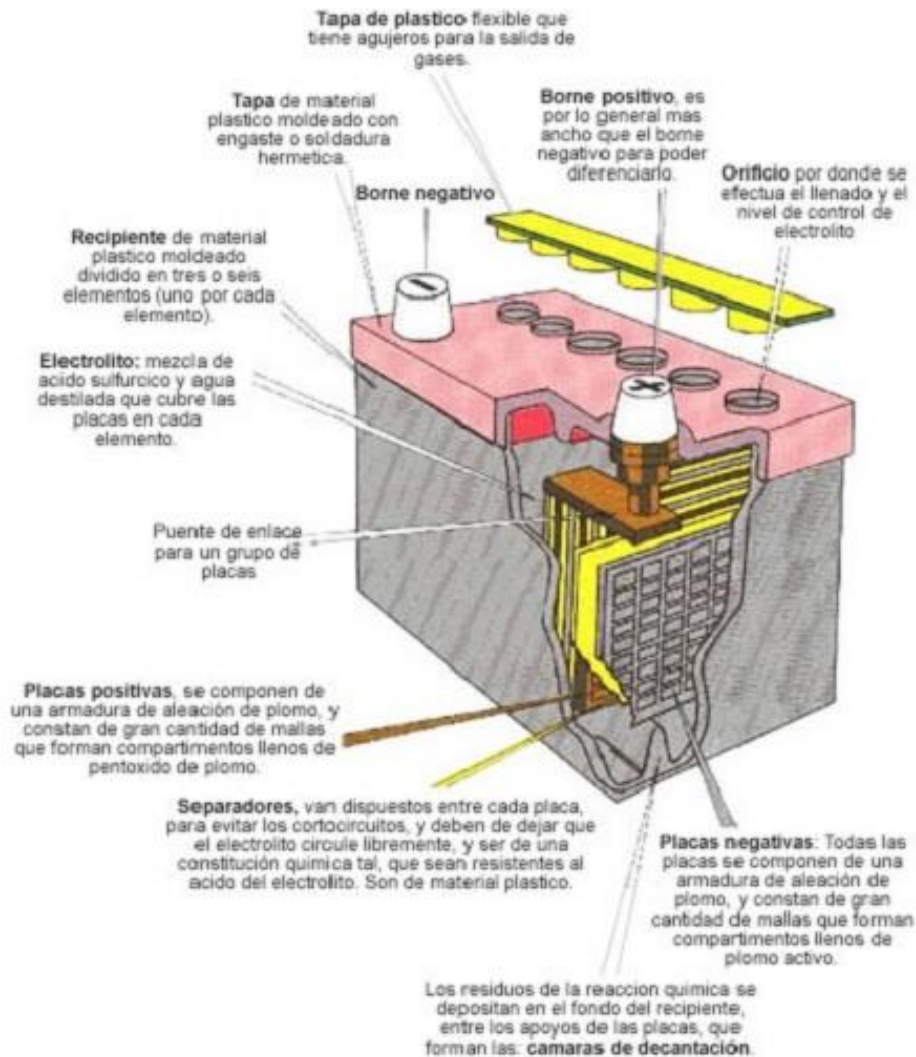


Figura 2.1– Estructura de una batería

En la práctica, muchos otros factores entran en juego, tales como la disponibilidad de material, facilidad de hacer que funcionen juntos, la capacidad para fabricar el producto final en el volumen y el costo. Como resultado, sólo unos pocos pares electroquímicos son ampliamente empleados en producir baterías comercialmente.

2.1.5. REACCIONES QUÍMICAS

A continuación se muestra la composición química de una célula de Pb-ácido, (ver figura 2.2), realizando una distinción en cuatro etapas: carga completa, la descarga, totalmente descargada y la carga. Se precisa de un electrodo de plomo esponja (Pb), otro electrodo de peróxido de plomo (PbO_2), y una solución electrolítica de ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluido con agua (H_2O).

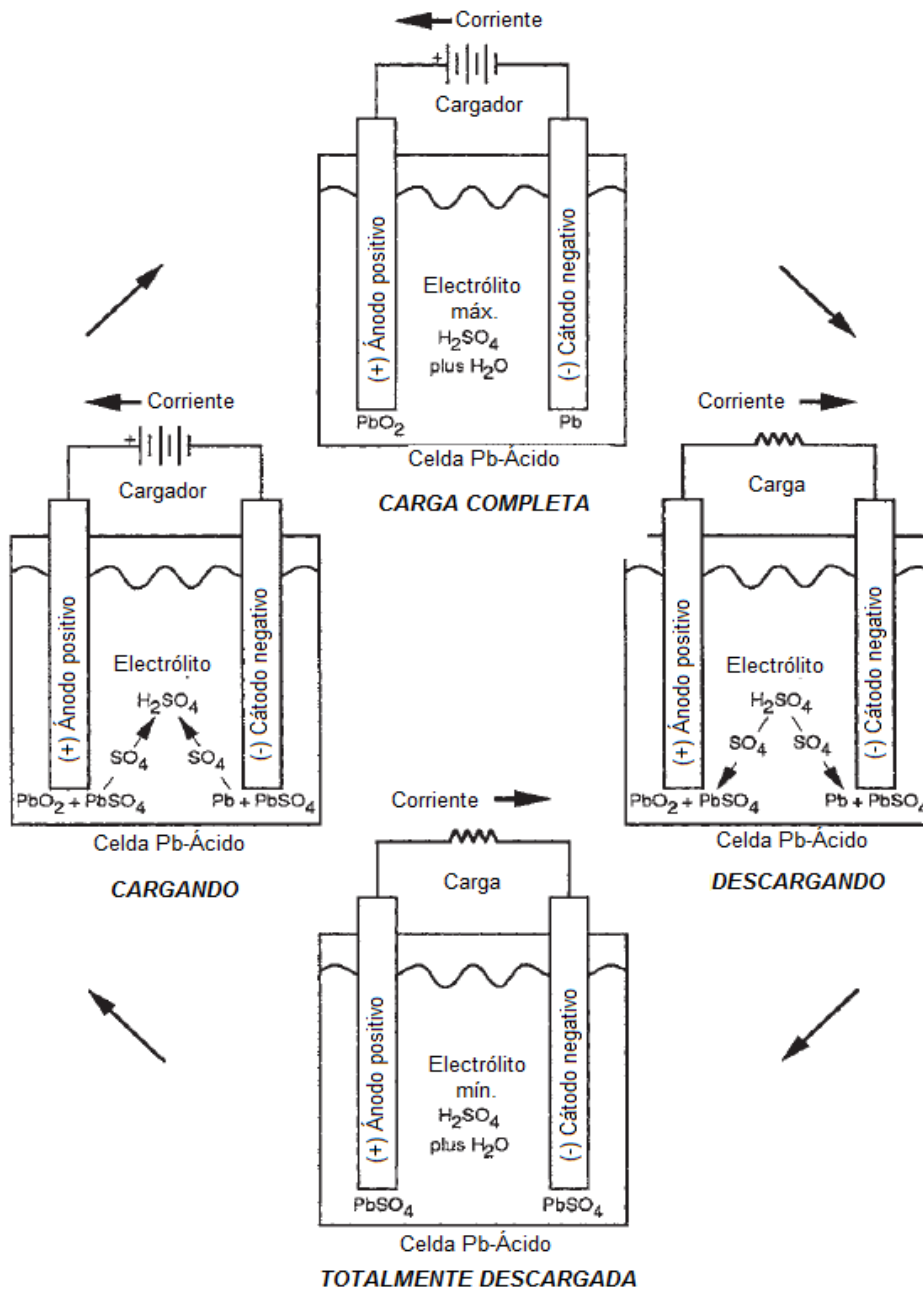
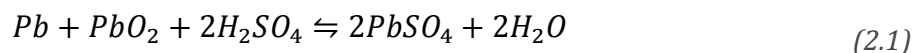


Figura 2.2-Reacciones químicas en una batería de Pb-ácido

El verdadero funcionamiento de cualquier batería viene descrito por la ecuación química que define su funcionamiento. En el caso de la batería de plomo-ácido, esta ecuación se da como:



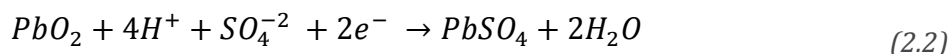
El lado izquierdo de la ecuación representa el estado de batería cargada, y el lado derecho representa el de descargada.

En una batería de plomo cargada, su placa ánodo positivo es casi todo peróxido de plomo (PbO_2), la placa de cátodo negativo es casi toda esponja de plomo (Pb), y su electrolito es principalmente ácido sulfúrico (H_2SO_4) (parte superior de la figura 2.2).

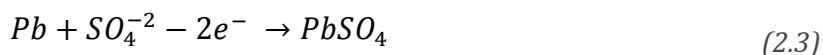
En una batería descargada, ambas placas son en su mayoría sulfato de plomo ($PbSO_4$) y la solución electrolítica queda muy diluida, es decir, en su mayoría agua (H_2O) (ver la parte inferior de la figura 2.2).

2.1.5.1. Reacciones químicas descarga

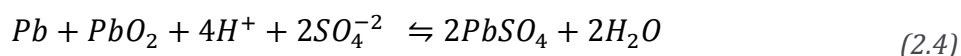
Para tener visión más precisa de la reacciones vamos a analizar por separado cada electrodo. El proceso de descarga del ánodo se describe como:



El proceso de descarga del cátodo se describe como:



Sumando las dos reacciones anteriores tenemos:

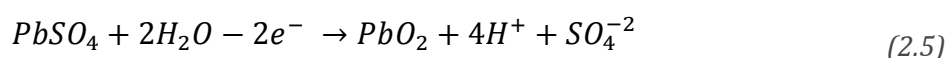


En la descarga, el cátodo adquiere el radical sulfato (SO_4) del electrolito y libera dos electrones en el proceso. Estos electrones son adquiridos por el ánodo deficiente en electrones, es decir; los electrones van desde el cátodo negativo al ánodo positivo, dentro de la batería, estableciendo un flujo de corriente a través de la carga externa desde el ánodo positivo al cátodo negativo.

En el proceso de descarga (a la derecha de la figura 2.2), ambos electrodos se recubran de sulfato de plomo ($PbSO_4$), un buen aislante que no conduce la corriente, y el radical sulfato (SO_4) es consumido del electrolito. Al mismo tiempo, el área física de las placas de plomo esponja (Pb) disminuye a medida que se recubre con sulfato de plomo ($PbSO_4$); esto aumenta la resistencia interna de la batería, lo cual produce una disminución de la tensión de salida.

2.1.5.2. Reacciones químicas carga

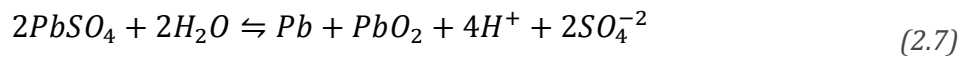
Procedemos a analizar por separado cada electrodo, al igual que en el caso anterior. El proceso de carga del ánodo se describe como:



El proceso de carga del cátodo se describe como:



Sumando las dos reacciones anteriores tenemos:



El proceso de carga (a la izquierda de la figura 2.2) se invierte el flujo electrónico a través de la batería y hace que el enlace químico entre el plomo (Pb) y el radical sulfato (SO_4) se rompa, liberando los radicales de sulfato de nuevo en la solución. Cuando todos los radicales de sulfato pasan de nuevo a la solución electrolítica, se dice que la batería esté completamente cargada. [7]

2.1.6. TERMINOLOGÍA

A lo largo de este proyecto será necesario mencionar distintos parámetros e índices, que definen las características de las baterías. Debido a esto y para acondicionar la introducción a los siguientes capítulos de este proyecto, se hace necesario presentar los siguientes parámetros.

2.1.6.1. Densidad del electrólito

La densidad o gravedad específica de cualquier líquido es la relación del peso de un cierto volumen de líquido dividido por el peso del volumen igual de agua.

Para el ácido sulfúrico puro tenemos una densidad específica de aproximadamente 1.835 kg/dm^3 y la del agua 1.000 kg/dm^3 . La disolución de ácido sulfúrico en agua, el electrólito, suele estar a razón de 36% de ácido, por lo que, en un elemento completamente cargado, podemos deducir la densidad del electrólito (ρ), es 1,275. Este valor varía de unas baterías a otra y de unos fabricantes a otros, y también se ve afectado por la temperatura.

Mientras que la densidad específica no tiene tanta importancia para otro tipo de baterías, para las de Pb-ácido juega un papel primordial, dado que la cantidad de ácido sulfúrico que se combina con las placas en un momento dado es directamente proporcional a la velocidad de descarga (amperios x hora), es decir, tenemos un indicador directo del estado de carga.[7]

2.1.6.2. Gasificación

A medida que la carga llega a su fin, otro fenómeno tiene lugar; en el cátodo se libera hidrógeno (H_2) y en el ánodo oxígeno (O_2). Esto es debido a que cualquier corriente de carga más allá de la requerida para liberar a la pequeña cantidad de radicales de sulfato de las placas, ioniza el agua del electrólito y comienza el proceso de electrólisis (separar el agua en gas de hidrógeno y oxígeno).

A pesar de que la mayoría de los gases de hidrógeno y oxígeno se recombinan para formar vapor de agua (parte de vapor se pierde en la atmósfera, siendo esto la razón principal de que se necesita la reposición periódica del agua en este tipo de batería), existe un gran potencial de explosión al ser el gas de hidrógeno muy

inflamable, por ello la carga se debe llevar a cabo en un área ventilada y libre de cualquier fuente de ignición.

2.1.6.3. *Sulfatación*

La sulfatación es una reacción electroquímica que se produce cuando se descarga una batería. Durante el uso normal o en el almacenamiento, el ácido sulfúrico de una batería está activo entre las placas. Esta reacción genera energía en forma de corriente eléctrica que transforma la composición química del ácido que está en contacto con las placas de plomo, formando un residuo sólido (sulfato de plomo), según lo explicado más arriba.

Durante el período de descarga, el ácido sulfúrico en estado líquido pasa a formar parte de las placas en forma de sulfato de plomo en estado sólido bajando la lectura de la densidad del electrolito. Sin embargo, después de usar la batería durante un tiempo, los ciclos de carga transformarán los residuos cristalinos sólidos en líquido de nuevo, pero no permite que el sulfato de plomo se transforme en su totalidad.

Algunos se mantendrán fijos en las placas o caerán hacia el fondo de la batería. Esto se llama de *estratificación*. La sulfatación reduce la concentración del electrolito y, en consecuencia, el voltaje de la célula también se reduce. A medida que la sulfatación aumenta también aumenta la resistencia interna y se produce un marcado aumento en la temperatura. Esas temperaturas más altas aumentarán también la pérdida de agua por evaporación. Todos estos procesos culminan en un fallo prematuro de la batería. La continua acumulación de sulfato acelera el proceso de debilitamiento y finalmente "sofoca" la batería.

2.1.6.4. *Sobrecarga*

La sobrecarga es la recarga por encima del estado de carga total. Puede resultar en daños permanentes a la batería, por ejemplo, pérdida de electrolito, corrosión, daños a la rejilla, etc.

2.1.6.5. *Autodescarga*

Todas las baterías con ácido se autodescargan, tanto si son usadas como si son almacenadas. Aunque ningún consumidor esté conectado a la batería, las reacciones químicas siguen ocurriendo, como en un circuito eléctrico interno cerrado. La autodescarga es causada por impurezas metálicas que causa la autodescarga.

El antimonio, usado como aleación para endurecer las rejillas de plomo, es una de esas impurezas metálicas que causa la autodescarga. En las baterías que se utilizan esta tecnología, una cantidad relativamente alta de antimonio, lo que resulta en una alta tasa de autodescarga.

Además del contenido de antimonio (la tecnología de la batería), la tasa de autodescarga depende principalmente de los siguientes factores [9]:

- **Temperatura.** Una temperatura más alta acelera los procesos químicos en las baterías de Pb-ácido, lo que aumenta la tasa de autodescarga.
- **Edad de la batería.** Cuanta más vieja sea la batería, mayor será la tasa de autodescarga.
- **Humedad.** Una alta humedad resulta en una tasa de autodescarga mayor.

2.1.6.6. *Vida útil*

La vida útil es el tiempo que la batería puede mantener sus prestaciones por encima de unos límites mínimos predeterminados. Definido también como el número de veces que la batería puede ser recargada, para recobrar su capacidad completa después de su uso.

La vida útil de una batería es determinada por diversos factores, como:

- Régimen de descarga.
- Régimen de carga.
- Mantenimiento.
- Temperatura.
- Tensión de fluctuación.

Para no perjudicar la vida útil de una batería, nunca se debe descargar bajo el nivel de profundidad permitido por el fabricante. Otro factor que abrevia la vida útil de las baterías conectadas en serie (banco de baterías) es el desequilibrio de las cargas de cada batería durante el proceso de recarga, pudiendo existir baterías con sobrecarga y otras con subcarga, a pesar que la carga del banco completo esta correcta.

2.1.6.7. *Estado de carga (SOC)*

Estado de carga SOC (State of charge:) se define como la capacidad disponible de una batería y podría ser comparada con el depósito de combustible de un vehículo. Se representa como un porcentaje de una referencia de carga completa, el cual debe ser actualizado periódicamente.

La estimación del estado de carga es esencial para alcanzar el comportamiento óptimo de un sistema que controle coches eléctricos o híbridos para maximizar la utilización del motor eléctrico con respecto al de combustión.

Uno de los factores más importantes que afectan a la estimación del SOC de una batería es el envejecimiento. Debido a los ciclos de carga y descarga, la capacidad de las celdas que forman la batería decrece con el tiempo. Este hecho induce a actualizar el máximo estado de carga disponible para la batería periódicamente ya que es la referencia para calcular el porcentaje antes mencionado.

2.1.6.8. *Profundidad de descarga (DOC)*

La profundidad de carga DOC (Depth Of Charge) mide la fracción de carga útil restante, teniendo en cuenta la corriente de descarga promedio. Es una medida del estado de agotamiento de la batería en función de la corriente de descarga, es decir; lo llena que está la batería con respecto al régimen de descarga. A mayor intensidad de descarga la batería pierde la carga más prematuramente, por lo tanto DOC será siempre menor o igual a SOC.[10]

2.1.6.9. *Voltaje de celda*

El voltaje de celda es la diferencia entre los potenciales que son generados entre las placas positivas y negativas en el electrolito. Esos potenciales dependen de los materiales de las placas, del electrolito y de su concentración. El voltaje de celda nos es un valor constante, sino que depende del estado de la carga (densidad específica) y de la temperatura del electrolito.

2.1.6.10. *Voltaje nominal*

En el caso de las baterías de Pb-ácido, el voltaje (teórico) nominal de una única celda es definido en 2 voltios.

El voltaje nominal de la batería como un todo resulta de la multiplicación de los voltajes de las celdas individuales por el número de celdas conectadas en serie.

2.1.6.11. *Voltaje de circuito abierto (OCV)*

El voltaje de circuito abierto OCV (Open Circuit Voltage) (o tensión fuera de carga, tensión sin carga) es el voltaje de la batería sin carga. El OCV cambia después del fin de los procesos de carga o descarga debido a la polarización y efectos de difusión. Después de un determinado tiempo, cuando el OCV alcanza un valor estable, se puede medir el llamado OCV de estado estable.

Como en el caso del voltaje de las celdas, el OCV depende del estado de carga de la batería y de la temperatura del electrolito. Si una OCV es medida poco después del proceso de carga, no será posible obtener el verdadero estado de carga. La batería necesita reposar a veces hasta 24 horas, hasta que un estado estable haya sido alcanzado. Es más preciso medir la densidad del electrolito para determinar el estado de carga, pero eso sólo puede ser hecho en modelos de baterías más antiguas, que poseen tapa de roscar, e incluso en estos casos la realización de la medida no es precisamente fácil.

2.1.6.12. *Intensidad*

El voltaje del cargador se usa para mantener la batería cargada, pero el voltaje realmente es el vehículo para llevar la corriente a la batería (o sacarla durante la descarga). Es la corriente la que convierte el sulfato de plomo en material activo en las rejillas.

Hay dos tipos de corriente DC (corriente continua) en una batería: la corriente de recarga, que es la corriente que se aplica al recargar la batería después de la descarga, y la corriente de flotación, que se usa para mantener la batería en un estado completamente cargado. Si hay una diferencia entre la configuración del cargador y el voltaje de la batería, esa diferencia causará que la corriente fluya [11]. Si la batería está completamente cargada la única corriente que fluye es la corriente de flotación que contrarresta la auto-descarga de la batería.

Como el diferencial de voltaje entre el cargador y la batería es pequeño, la corriente de flotación es pequeña. Cuando hay una diferencia de voltaje grande, como después de la descarga, la corriente es alta y se limita por el cargador hasta que la diferencia de voltaje sea menor.

El incremento en corriente de flotación puede ser un indicador de la falla de la batería. Al medir la corriente de flotación, puede ser posible evitar fallos catastróficos de la batería y daños del equipo conectado y cercano.

2.1.6.13. *Impedancia interna*

La impedancia interna es la resistencia que oponen todos los componentes internos de la batería como electrodos, electrolito y terminales y varía en función del estado de carga y el estado de salud. Aumenta con la descarga de la batería y con el envejecimiento de ésta. Contra más impedancia interna menor rendimiento de la batería.

Consta de una parte real y otra imaginaria, principalmente capacitiva. En las corrientes de carga y descarga sólo interviene la parte resistiva (resistencia interna). La impedancia es muy relevante a la hora de determinar el envejecimiento de la batería, pero es imposible medir directamente la resistencia interna de una batería, por ello se calcula mediante los datos de corriente y voltaje medidos sobre ella. En caso de necesitar información complementaria es necesario realizar un análisis exhaustivo en AC.

2.1.6.14. *Capacidad nominal*

La capacidad nominal es la cantidad de electricidad que puede obtenerse mediante la descarga total de una batería cargada al máximo. Se mide en Coulombs (C) o Amperios-hora (Ah), $1\text{Ah} = 3600\text{ C}$. Amperios-hora, por lo tanto, también es una unidad de carga (Q).

La capacidad de la batería siempre va referenciada a un régimen de descarga marcado por el fabricante. El régimen de descarga es el número de horas en que una batería es capaz de suministrar corriente hasta que se descarga completamente. Los fabricantes suelen indicar la capacidad para regímenes de descarga de 100, 20 y 10 horas. Así, si una batería posee una capacidad de 1200Ah para 100 horas, quiere decir que esta batería es capaz de suministrar 12 A durante esas 100 horas. Pero por ejemplo para 120A duraría bastante menos de 10 horas.

2.1.6.15. *Eficacia (%)*

La eficacia es la fracción de energía eléctrica que devuelve la batería, en proporción a la energía que ha sido necesaria para cargarla. Cuanto más alta, mayor será su rendimiento, idealmente el 100%. También es importante que una batería mantenga su eficacia en función del tiempo de almacenamiento.

2.1.6.16. *Efecto de la temperatura*

La temperatura es uno de los factores externos que más afectan al correcto funcionamiento de las baterías. La temperatura óptima es en torno a 20°C. Si esta temperatura desciende, su capacidad también se ve reducida. Generalmente, por cada grado de aumento o descenso, la capacidad de la batería varía en un 0,43 %. Las altas temperaturas, por otro lado, son extremadamente dañinas para la batería y acortan sustancialmente su vida útil. Más o menos, por cada 10°C de aumento por encima de los 35 °C, el tiempo de vida se reduce a la mitad en cada profundidad de descarga.

2.1.7. TIPOS DE BATERÍAS DE PB-ÁCIDO

Las baterías Pb-ácido pueden subdividirse teniendo en cuenta distintos criterios de selección [12]. Sin intentar cubrir todas las alternativas, los criterios de selección más importantes son:

- Por tipo de placas.
- Por tipo de aleación.
- Por tipo de mantenimiento requerido.
- Por tipo de electrólito.
- Por el uso.
- Por la retención de agua
- Por el régimen de descarga

a.- Por tipo de placas.

Existen dentro de las baterías de PB-ácido 3 tipo de placas básicas:

- Placas Planas empastadas.
- Placas Tubulares.
- Placas Planté.

b.- Por tipo de aleación.

- Aleaciones de Plomo-Antimonio
- Aleaciones de Plomo-Selenio

- Aleaciones de Plomo-Calcio

c.- Por tipo de mantenimiento requerido

- Mantenido: Si es de alto contenido de antimonio.
- Bajo mantenimiento: Si es de Pb-selenio.
- Libre mantenimiento: Si es de Pb-Calcio.
- Sin atención: Si es sellada.

d.- Por tipo de electrólito

Existen dentro de las baterías de Pb-ácido tres tipos de estados del electrólito, el cual es siempre una solución de ácido sulfúrico diluido en agua destilada. El electrólito puede estar en estado:

- Líquido.
- Gelificado.
- Absorbido.

El *electrólito líquido* puede tener distintas densidades entre 1.215 gr/cm³. y 1.300 gr/cm³. El valor de densidad está definido por la conjunción de varios factores, pero uno de los más importantes es el volumen del contenedor. Dado que para una cantidad de material activo determinada hace falta una cantidad definida de ácido absoluto, en función del volumen total disponible para el electrólito se definirá la densidad necesaria del mismo. Otros factores que entran en consideración son las temperaturas y el uso.

El *electrólito gelificado* es uno de los dos sistemas que existen para la fabricación de baterías selladas. Cabe destacar que una batería es sellada, no por el empleo del electrólito gelificado (el que permite que se realice la recombinación gaseosa), sino por el uso de la aleación de Pb-Calcio, que dado el bajo nivel de gasificación, permite que se pueda realizar dicha recombinación. El gel se logra a través de la mezcla del electrólito con una sílice amorfa dando como resultado un compuesto de la consistencia de un gel.

Las celdas de gel son similares a las de electrólito absorbido, ya que el electrólito también se encuentra suspendido. Sin embargo, en las baterías de electrólito absorbido el electrólito sigue siendo líquido. Por el contrario, el electrólito de una batería de gel, tiene un aditivo de sílice (desecante) que hace que el electrólito se solidifique. Los voltajes de carga para las baterías de gel, son algo menores que para el resto de las baterías de Pb-ácido y además son muy sensibles a la sobrecarga. Si no se utiliza el cargador adecuado, la capacidad de la batería se reducirá significativamente y el fallo prematuro está asegurado. Estas baterías son ideales para

llegar a una profundidad de descarga muy alta y tienen una duración algo mayor en climas calurosos.

El *electrólito absorbido* es el otro sistema existente para la fabricación de las baterías selladas. En este caso, el electrólito está absorbido por el separador, el cual está compuesto por una fibra de vidrio microporosa que mantiene suspendido el electrólito, y permite la recombinación gaseosa.

En realidad, las baterías de electrólito absorbido son una variante de las baterías VRLA selladas. Se consigue la mayor eficiencia si se carga la batería antes de llegar a una profundidad de descarga del 50%.

e.- Según su uso

En este tipo de clasificación tendremos:

- Baterías de arranque destinadas al arranque de motores.
- Baterías de tracción, entrega energía directamente para dar movimiento a un equipo, como ser una carretilla eléctrica, un vehículo eléctrico, etc.
- Baterías para energía solar y eólica. Almacenan energía eléctrica como resultado de la transformación de la energía solar o eólica.
- Baterías estacionarias para usos en comunicaciones, señalamientos, alarmas, iluminación, accionamiento, etc.
- Baterías para U.P.S. para altas corrientes instantáneas o descargas menores de 60 minutos.

f.- Por la retención de agua

- Inundada (húmedas, ventiladas)
- Regulada por válvula (VRLA)

En baterías inundadas los gases de hidrógeno y oxígeno se escapan y hay que añadir agua periódicamente. En baterías VRLA selladas los gases de hidrógeno y oxígeno se combinan para formar agua. Adicionalmente, en las baterías VRLA el ácido queda inmovilizado por AGM o en un gel.

g.- Por tipo de régimen de descarga

- De arranque
- De descarga profunda (o de ciclo profundo).

Las *baterías de arranque* están diseñadas para entregar grandes cantidades de energía en muy poco tiempo. Las placas son más finas pero hay más cantidad, además tienen una composición química ligeramente diferente. Estas baterías no admiten una gran descarga y por lo tanto deberíamos mantenerlas siempre con el máximo de carga.

Las *baterías de descarga profunda*, no pueden suministrar tanta energía instantánea como las de arranque, pero son capaces de aguantar descargas de mucha mayor duración. Este es el caso de *las baterías de tracción* utilizadas en maquinaria de manutención como carretillas, elevadores, etc., y *las baterías estacionarias*. Una batería para uso estacionario es la que se mantiene permanentemente cargada mediante un rectificador auto-regulado.

Este rectificador puede, también, alimentar a un consumo, como en el caso de las centrales telefónicas, o a otro equipo de conversión de energía, como en el caso de las UPS (Uninterruptible Power System), el equipo en cuestión es el inversor que alimenta al consumo. En los sistemas de iluminación de emergencia, en cambio, el rectificador solo alimenta a la batería. En cualquier caso, lo importante es que la batería se descarga con muy poca frecuencia y el rectificador debe recargarla, luego de una descarga, y mantenerla perfectamente cargada, compensando la auto-descarga interna.

Estas baterías han sido especialmente diseñadas para operar en ciclado de profundidad superior a 50%. No se debe utilizar una batería de propósitos generales cuando los ciclos son profundos (por ejemplo, en un carro de golf, en un vehículo eléctrico,...). Las baterías de ciclo profundo poseen placas reforzadas para evitar su agotamiento prematuro y poder soportar mejor la exigencia del ciclado.

Las *baterías* conocidas como "*de doble propósito*", no son más que un compromiso entre las de arranque y las de descarga profunda, teniendo peores características que las específicamente diseñadas para una de las dos funciones.

2.1.8. TIPOS DE FALLOS BATERÍAS PB-ÁCIDO

2.1.8.1. Tipos de fallos de baterías de Pb-ácido (Inundada)

- Corrosión de la rejilla positiva
- Sedimento incrustado (pulido)
- Corrosión del conductor superior
- Sulfatación de la placa
- Cortos duros (pedazos de pasta)

Cada tipo de batería tiene varios tipos de fallo, algunos más relevantes que otros. En baterías de plomo-ácido inundadas los tipos de fallo predominantes están enumerados arriba [13]. Algunos se manifiestan debido al uso, como los sedimentos debidos a excesivos ciclos. Otros ocurren de manera natural, como el crecimiento de rejillas positivas (oxidación). Es simplemente una cuestión de tiempo hasta que la batería falle. El mantenimiento y las condiciones medioambientales pueden incrementar o disminuir los riesgos de fallos de baterías prematuros.

La corrosión de rejillas positivas es el tipo de fallo de baterías de plomo-ácido inundadas esperado. Las rejillas (plomo-calcio, plomo-antimonio, plomo-antimonio-selenio) se convierten en óxido en el transcurso del tiempo. Como el óxido es un cristal más grande que la aleación de plomo metal, la placa crece. Este crecimiento ha sido bien caracterizado y se tiene en cuenta a la hora de diseñar baterías. En muchas hojas de datos sobre baterías hay una especificación para el aclarado al fondo del vaso para permitir que la placa crezca de acuerdo con su vida útil.

Al final de la vida útil la placa habrá crecido lo suficiente para abrir las tapas de la batería. Pero excesivos ciclos, temperaturas y sobrecargas también pueden incrementar la velocidad de la corrosión de rejillas positivas.

El sedimento es el desprendimiento del material activo de las placas. Es la segunda razón por la que los fabricantes de baterías dejan espacio en el fondo de los vasos para permitir una determinada cantidad de sedimento hasta que llegue al punto de producir un corto en la parte inferior de las placas dejando inutilizable la batería. El voltaje caerá y la cantidad de la caída dependerá del corto. Hay que señalar que el pulido en cantidades razonables es normal.

Algunos diseños de baterías tienen placas envueltas para que el sedimento se quede en la placa y no caiga al fondo (baterías UPS). Por eso, el sedimento no crece en diseños de placas envueltas.

La corrosión del conductor superior, que es la conexión entre las placas y los terminales, es difícil de detectar incluso con una inspección visual, ya que ocurre cerca de la parte superior de la batería y queda oculto por la tapa.

La sulfatación de la placa es un problema de paso eléctrico. Una exhaustiva inspección visual a veces puede encontrar los trazos de la sulfatación de la placa.

2.1.8.2. Tipos de fallos de baterías de Pb-ácido (VRLA)

- Secado (pérdida de compresión)
- Sulfatación de la placa (ver arriba)
- Cortos suaves y duros
- Fuga del terminal
- Escape termal
- Corrosión de rejillas positivas (ver arriba)

El secado es un fenómeno que ocurre debido al exceso de calor (cuando no hay ventilación apropiada), sobrecargando, lo que puede causar temperaturas internas elevadas, temperaturas de ambiente altas, etc. A temperaturas internas elevadas las celdas selladas se descargarán a través del PRV (Pressure reducing valve). Cuando se descarga suficiente electrolito, se pierde el contacto con las placas, lo que incrementa la impedancia interna y se reduce la capacidad de la batería.

En algunos casos, el PRV se puede quitar y se puede añadir agua destilada (pero solo en los peores casos y por empresas de servicios autorizadas, ya que quitar el PRV puede hacer inválida la garantía). Este tipo de fallo se detecta fácilmente a través de la impedancia y es uno de los tipos de fallos más comunes en baterías VRLA.

Los cortos suaves (dendríticos) y duros ocurren por varias razones. Los cortos duros normalmente son causados por pedazos de pasta empujada por la fibra microporosa produciendo un corto en la placa adyacente (polaridad opuesta). Los cortos suaves, por el contrario, son causados por descargas profundas. Cuando la gravedad específica del ácido baja demasiado, el plomo se disuelve en él. Como el líquido (y el plomo disuelto) quedan inmovilizados en la fibra, cuando la batería se descarga, el plomo sale de la solución formando hilos de plomo delgado conocidos como dendrítico.

El escape termal es relativamente fácil de evitar, simplemente usando cargadores de temperatura compensada y ventilando apropiadamente el cuarto/cabina de la batería. Los cargadores de temperatura compensada reducen la corriente de carga al aumentar la temperatura. Recuerde que el calor es una función de la corriente al cuadrado. Aunque los escapes termales se pueden evitar con cargadores de temperatura compensada, la causa esencial todavía está presente.

2.1.9. ESTÁNDARES PARA PRUEBAS DE BATERÍAS

Hay muchos estándares y prácticas empresariales para pruebas de baterías. Normalmente comprenden inspecciones (observaciones, acciones y mediciones) y pruebas de capacidad. Los estándares IEEE más conocidos para las baterías de Pb-ácido son:

- IEEE 450 para plomo-ácido inundado
- IEEE 1188 para plomo-ácido sellado

2.1.9.1. IEEE 450

IEEE 450, "Prácticas recomendadas para mantenimiento, prueba y reemplazo de baterías de plomo-ácido ventiladas para aplicaciones estacionarias" describe la frecuencia y el tipo de mediciones necesarias para validar la condición de la batería. El estándar cubre inspecciones, pruebas de capacidad, acciones correctivas, criterios de reemplazamiento de baterías, etc.

A continuación tenemos una descripción resumida del mantenimiento, para las instrucciones completas vea los estándares IEEE 450.

Inspecciones

- Las inspecciones mensuales incluyen apariencia y mantenimiento de voltaje en serie, voltaje de rizado, corriente de rizado, corriente y voltaje de salida del cargador, temperatura ambiente, temperatura de voltaje y electrolito en las celdas

piloto, corriente de carga de flotación de la batería o gravedad específica en las celdas piloto, baterías puestas a tierra sin intención, etc.

- Las inspecciones cuatrimestrales incluyen las mismas mediciones que las inspecciones mensuales y además la tensión de cada celda, gravedad específica del 10% de las celdas de la batería y corriente de carga flotante, temperatura de una muestra representativa del 10% o más de las celdas de la batería.
- Una vez al año se debería extender una inspección cuatrimestral con gravedad específica de todas las celdas de la batería, temperatura de cada celda, resistencia de celda a celda y conexión de terminal en toda la cadena.

Pruebas de capacidad (prueba de descarga)

- En la instalación (prueba de aceptación).
- En los primeros dos años de servicio
- Periódicamente. Los intervalos no deberían ser más del 25% de la vida útil esperada.
- Anualmente cuando las baterías muestren signos de degradación o han alcanzado el 85% de la vida útil esperada. La degradación es indicada cuando la capacidad de la batería baja más del 10% de su capacidad en pruebas previas o está por debajo del 90% de lo establecido por el fabricante. Si la batería ha alcanzado el 85% de su vida útil, pero presenta el 100% de lo establecido por el fabricante y no tiene signos de degradación, puede ser probada en intervalos de dos años hasta que muestre signos de degradación.

2.1.9.2. IEEE 1188

IEEE 1188, "Prácticas recomendadas para mantenimiento, prueba y reemplazo de baterías de plomo-ácido reguladas por válvula para aplicaciones estacionarias" describe la frecuencia y el tipo de mediciones necesarias.

A continuación tenemos una descripción resumida del mantenimiento, para las instrucciones completas vea los estándares IEEE 1188.

Inspecciones

- Las inspecciones mensuales incluyen voltaje de flotación del terminal de la batería, voltaje y corriente de salida del cargador, temperatura ambiente, inspección visual y corriente de flotación DC por cadena.
- Las inspecciones cuatrimestrales incluyen las mismas mediciones que las inspecciones mensuales y además el valor de impedancia de la celda/unidad, temperatura del terminal negativo de cada celda y voltaje de cada celda. Para aplicaciones con una descarga de una hora o menos, se debe medir la resistencia del 10% de las conexiones entre las celdas.

- Dos veces al año las mismas mediciones que para las inspecciones cuatrimestrales y además una verificación y registro del voltaje de cada celda/unidad, valores óhmicos internos de celda/unidad, temperatura del terminal negativo de cada celda/unidad de la batería.
- Una vez al año las mismas mediciones que para las inspecciones anteriores y además resistencia de celda a celda y conexión de terminal de toda la batería y corriente de rizado AC y/o voltaje impuesto en la batería.

Pruebas de capacidad (prueba de descarga)

- En la instalación (prueba de aceptación)
- Periódicamente. Los intervalos no deberían ser más del 25% de la vida útil esperada o dos años, el que sea menor.
- Cuando los valores de impedancia han cambiado significativamente entre las lecturas o cuando hayan ocurrido cambios físicos.
- Anualmente cuando las baterías muestren signos de degradación o hayan alcanzado el 85% de la vida útil esperada. La degradación es indicada cuando la capacidad de la batería baja más del 10% de su capacidad en pruebas previas o está por debajo del 90% de lo establecido por el fabricante.

Reemplazo de la batería

Ambas, IEEE 450 y IEEE 1188 recomiendan reemplazar la batería si su capacidad está por debajo del 80% de lo establecido por el fabricante. Características físicas tales como la condición de la placa o temperaturas de las celdas anormalmente altas muchas veces determinan un reemplazo completo o de las celdas individuales.

2.2. CONTROLADOR CURTIS

2.2.1. INTRODUCCIÓN

Para mediar entre la parte lógica de control e instrucciones y la parte de potencia necesitamos un dispositivo capaz de entender las dos partes y al mismo tiempo ser capaz de manipularlas. En nuestro caso ese mediador es el controlador *Curtis 1268-5403*.

El manejo de la parte lógica o de baja potencia es llevado a cabo a base de microprocesadores, mientras que, la parte de potencia utiliza la tecnología MOSFET de potencia. Conseguir las prestaciones necesarias es cuestión y secreto del fabricante, en este trabajo se trata de entender y caracterizar el dispositivo en base a las necesidades para sacarle el máximo provecho.

2.2.2. CONEXIONES

2.2.2.1. Señales de baja potencia

Para la comunicación y el manejo del controlador el fabricante proporciona una serie de conexiones situadas en la parte superior del dispositivo, ver figura 2.3.

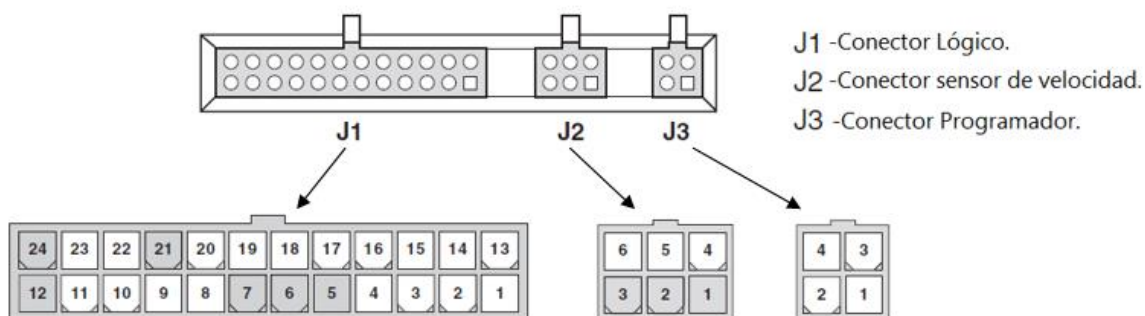


Figura 2.3-Conexiones baja potencia.

El conector de 24 pines (J1) proporciona las conexiones del control lógico. Utiliza un conector de acoplamiento tipo Molex Mini-Fit 24 pines, al que el fabricante recomienda conectar cables entre 18-24 AWG (American Wire Gauge). En la tabla 2.3 tenemos una descripción de cada uno de los pines de J1.

El conector de 6 pines (J2) proporciona las conexiones para un sensor de velocidad de efecto Hall. Utiliza un conector de acoplamiento tipo Molex Mini-Fit, igual que el anterior pero con menos pines. Ver descripción de los pines en la tabla 2.2.

Tabla 2.2-Conector Sensor de velocidad J2

Pin	Control	Descripción
J2-1,2,3	(sin uso)	—
J2-4	Ground	GND del sensor
J2-5	Input	Entrada de la señal proveniente sensor
J2-6	Power	+15V del sensor

El conector de 4 pines (J3) proporciona las conexiones para realizar la programación del controlador. El fabricante proporciona el controlador ya programado, pero para sacarle mejor provecho ofrece esta conexión. Cabe señalar que el cable de conexión y el software se deben adquirir aparte del controlador. Ver descripción de los pines en la

tabla 2.4.

Tabla 2.3-Conector Lógico J1

Pin	Control	Descripción
J1-1	Keyswitch Input (KSI)	<i>Entrada de la señal de la bobina del contacto principal</i>
J1-2	Logic Enable	<i>Entrada del interruptor marcha/parada</i>
J1-3	Fuse Sense	<i>Entrada del interruptor marcha/parada</i>
J1-4	Logic Power	<i>Alimentación al control lógico</i>
J1-5	(sin uso)	—
J1-6	(sin uso)	—
J1-7	(sin uso))	—
J1-8	Pedal Interlock Switch	<i>Entrada del interruptor del pedal, cable del acelerador</i>
J1-9	WalckAway Return	<i>Retorno del relé marcha atrás</i>
J1-10	Forward	<i>Entrada interruptor marcha</i>
J1-11	Reverse	<i>Entrada interruptor marcha atrás</i>
J1-12	(sin uso)	—
J1-13	Pot High	<i>+5V (alimentación a través de 453Ω)</i>
J1-14	Pot Low	<i>GND (tierra de la alimentación)</i>
J1-15	Pot Wiper	<i>Entrada de limpiaparabrisas</i>
J1-16	LED Ground	<i>GND led externo</i>
J1-17	Main Contactor	<i>conductor bobina del contactor de salida del lado de baja</i>
J1-18	Brake Light Driver	<i>controlador relé de salida del lado de baja</i>
J1-19	Reverse alarm	<i>alarma de salida del conductor del lado de baja</i>
J1-20	Mode Switch	<i>entrada de interruptor de modo</i>
J1-21	(sin uso)	—
J1-22	External LED Driver	<i>controlador LED de salida del lado de alta</i>
J1-23	Auxiliar Driver	<i>WalkAway™/ EMB salida del lado de baja</i>
J1-24	(sin uso)	—

Tabla 2.4-Conector Sensor de velocidad J3

Pin	Control	Descripción
J3-1	Rx Data	Conexión de datos
J3-2	B-	GND del sensor
J3-3	Tx Data	Conexión de datos
J3-4	Power	+15V

2.2.2.2. Conexiones de potencia

Para la alta potencia el controlador trae incorporado 5 conexiones, figura 2.4, dos de ellas para la alimentación desde las baterías, $B +$ y $B -$, una para el inducido del motor, M , y otras dos para el campo del motor, $F1$ y $F2$. A través de estas conexiones se hace efectivo el control y la puesta en marcha del motor según las especificaciones programadas.

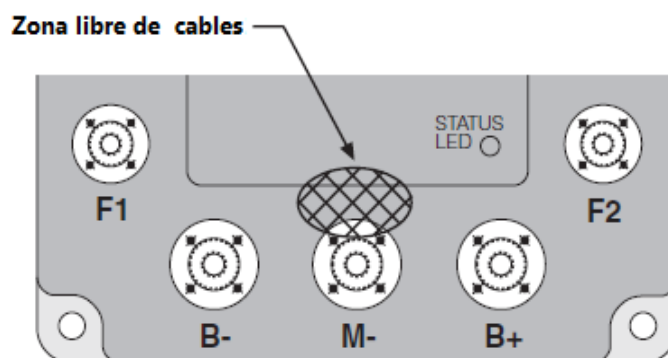


Figura 2.4-Conexiones de alta potencia.

2.2.3. CABLEADO DEL CONTROLADOR

Conocidas las conexiones que proporciona el controlador, se presenta una configuración estándar del cableado del controlador. En la figura 2.5 se muestra la configuración de forma esquemática del cableado de las utilidades que ofrece el dispositivo.

Para más detalles técnicos del controlador, conexiones y programación consultar el [27].

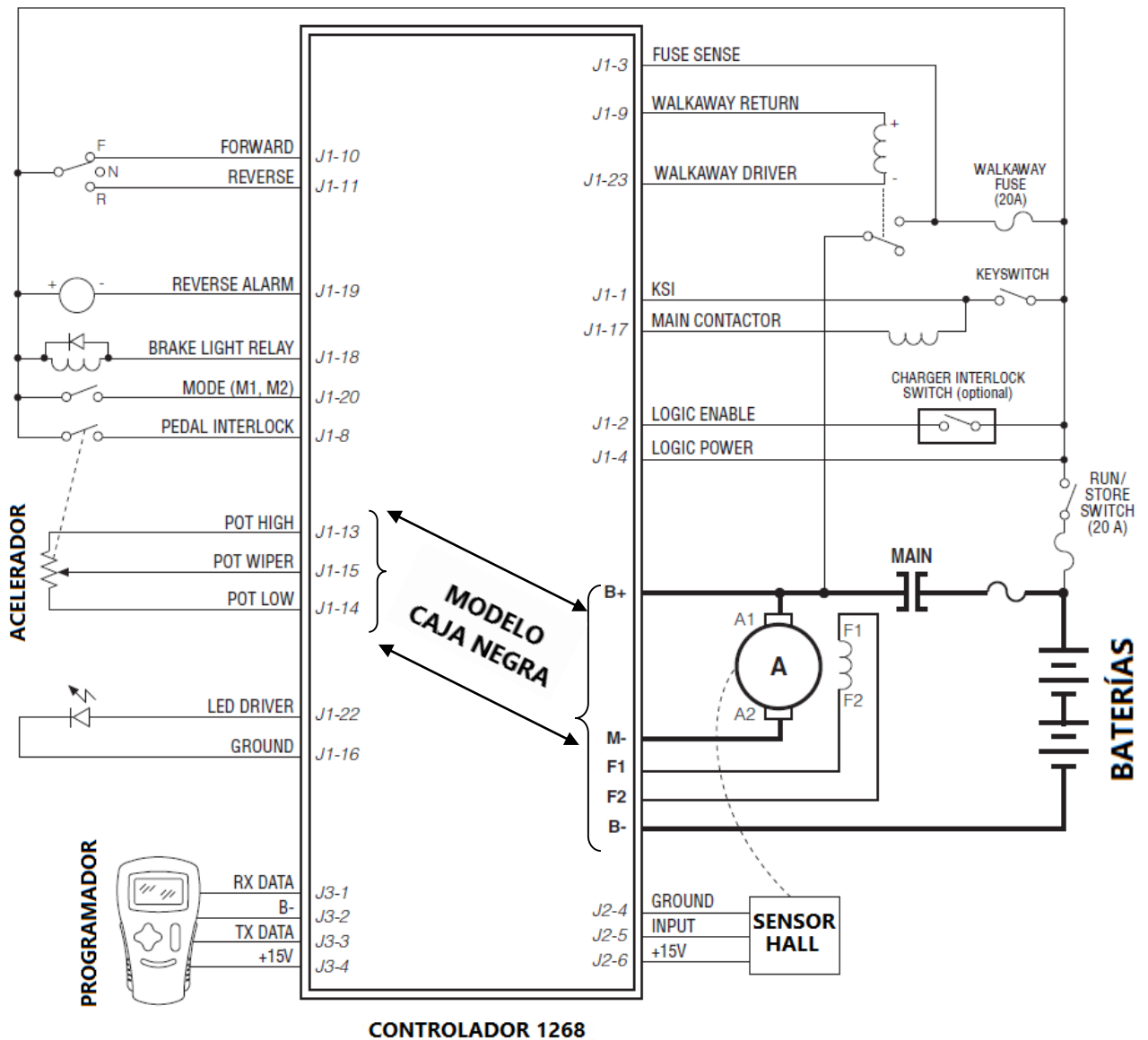


Figura 2.5-Configuración estándar del cableado del controlador.

2.2.4. UBICACIÓN EN EL PROYECTO

De las funciones que el controlador realiza en este proyecto se centra en obtener un modelo que relacione las consignas que recibe el controlador del acelerador (J1 – 13, 14, 15) con la salida en tensión que llega a los bornes del motor.

Dicho modelo permitirá conocer la dinámica de la demanda energética del motor, y gracias a ello se tendrá la posibilidad de controlar los picos de descarga de las baterías. Aunque para las baterías no supongan un gran problema, al estar preparadas para grandes picos, en términos de eficiencia energética suponen un desperdicio de la tan preciada energía almacenada a bordo del vehículo.

CAPÍTULO 3. EL VEHÍCULO eCARM

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.

Como parte del proyecto “Estrategias de control y supervisión para la gestión integrada de instalaciones en entornos energéticamente eficientes” (DPI2010-21589-C05-C04), en el año 2010 la Universidad de Almería adquirió a través de la empresa *Tesur* el modelo de vehículo eléctrico *LITA GLe2-2S*. Éste fue fabricado por la compañía china *Greenland*, en cuya web pueden encontrarse una ficha técnica con las características del mismo [20] que se resumen en la tabla 3.1. *Tesur* fue la encargada de instalar y cablear el motor de la dirección asistida y el sistema encargado de controlar la marcha del coche, que queda ubicado en la parte delantera del vehículo (Caja *Tesur*).

Tabla 3.1- Características técnicas del vehículo eCARM

Longitud	Anchura	Altura	Distancia entre ejes	Paso ruedas traseras	Paso ruedas delanteras
2680 mm	1510 mm	1780 mm	1830 mm	1285 mm	1260 mm
Pendiente máxima	Velocidad máxima	Autonomía	Radio de giro mínimo	Ángulo de ataque	Ángulo de salida
20 %	45 km/h	90 km	4,3 m	24º	30º
	Peso	Peso sin baterías	Peso máximo	Potencia máxima	
	740 kg	460 kg	950 kg	4,3 kW	

La alimentación se compone de ocho baterías *GreenSaver* modelo *SP210-6* a 6V, 210 Ah/5h conectadas en serie, por lo que el voltaje total suministrado es de 48V. Aunque para el motor principal el voltaje tiene un valor adecuado, es necesario colocar varias convertidores DC/DC en lugares estratégicos que se encarguen de disminuir la tensión a los niveles adecuados para los sensores e instrumentos instalados por el equipo de investigación de la UAL. La recarga de las baterías se realiza directamente a través de la red eléctrica, para lo cual el vehículo dispone de un cargador modelo *QQE1200-5CH07* que realiza la conversión 220V AC a 48V DC.

En los siguientes apartados se detallan los elementos que forman parte, hasta la fecha, del sistema de control que permite el funcionamiento del *eCARM* como vehículo autónomo: por un lado, la parte física o hardware en la que se incluyen los sensores, actuadores, tarjetas y PCs embarcados; por otro, la parte lógica o software que se encarga de procesar la información tanto a bajo como a alto nivel.

3.2. COMPONENTES HARDWARE

A continuación, se realiza una descripción de los dispositivos que se encuentran actualmente instalados en el eCARM. En la tabla 3.2 aparece un listado de todos ellos, indicando entre paréntesis el número de unidades cuando es superior a una, así como la referencia con la se puede consultar su emplazamiento en el vehículo figura 3.1.

Tabla 3.2-Lista de componentes del vehículo eCARM.

Ref.	Denominación del dispositivo	Ref.	Denominación del dispositivo
Sistema de control			
1	Ordenador embebido (PC1)	Sensores	
2	Ordenador industrial (PC2)	11	IMU <i>Xsens</i>
3	<i>SBC Raspberry Pi</i>	12	GPS <i>Hemisphere</i>
4	Controlador de la dirección	13	Láser <i>SICK</i>
5	Controlador <i>Curtis</i>	14	Cámara <i>Flea3</i> (x2)
Tarjetas de E/S			
6	<i>NI USB-6211</i>	15	Encoder <i>SICK</i>
7	<i>PhidgetEncoder HighSpeed 4-Input</i>	16	Encoder <i>Phidgets</i> (x2)
8	<i>Claraquino v1.0</i>	17	Amperímetro <i>Honeywell</i>
Actuadores			
9	Motor de impulsión <i>XQ-4,3</i>	18	Amperímetro <i>LEM</i> (x3)
10	Motor de la DAE	19	Voltímetro <i>MRC</i> (x3)
		20	Sensor de Tª <i>LM335AZ</i> (x3)

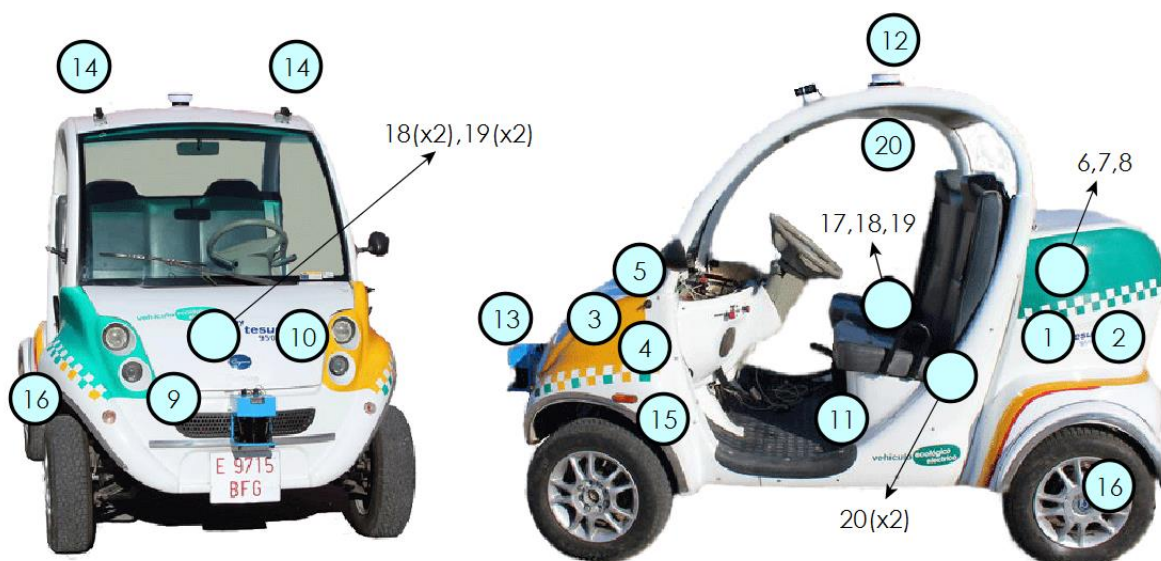


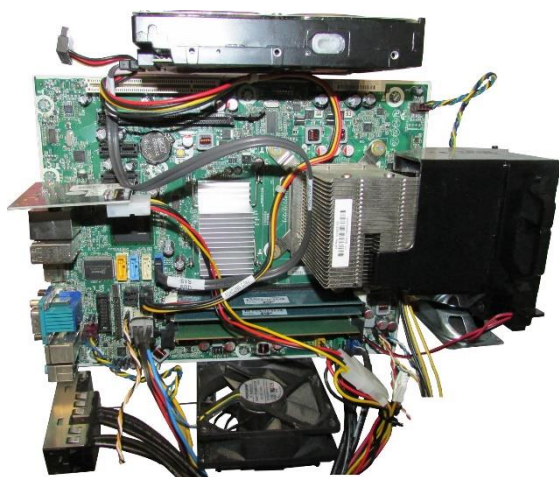
Figura 3.1-Emplazamiento de los componentes

3.2.1. SISTEMA DE CONTROL.

Para comunicarse con los sensores, analizar la información que ofrecen y enviar las órdenes oportunas a los actuadores se precisa de hardware programable, por lo que el coche eléctrico está equipado con los siguientes elementos: un ordenador personal adaptado PC1, un ordenador industrial PC2, un ordenador de placa reducida (SBC) y una placa con microprocesador para el control de la dirección.

El **ordenador embebido**, figura 3.2(a), situado en el maletero es el principal integrante del sistema de control. Se trata de un PC convencional al que se le han retirado algunos periféricos así como la carcasa original para adaptarlo al uso del vehículo. Cuenta con un procesador Intel de 4 núcleos a 2 GHz y 4 GB de memoria RAM para hacer funcionar el sistema operativo *Ubuntu 12.04* de 64 bits. Además, es el sistema anfitrión en la arquitectura software y el que sirve como interfaz de comunicación con el usuario. Sobre éste se ejecutan, por el momento, los módulos de visión artificial, odometría, control de la dirección del vehículo, control de la aceleración y almacenamiento de datos proveniente de los sensores.

También, en el maletero puede encontrarse el **ordenador industrial**, figura 3.2(b), especialmente diseñado para soportar ambientes hostiles. Incorpora un procesador Intel de 4 núcleos a 1,2 GHz y 2 GB de memoria RAM que trabaja con el sistema operativo *Windows 7* de 32 bits. Asimismo, se encarga de los módulos de relativos al láser, la unidad IMU y la tarjeta de adquisición de datos *NI USB-6211*.



(a) Ordenador embebido PC1



(b) Ordenador industrial PC2

Figura 3.2-Ordenadores embarcados en el eCARM

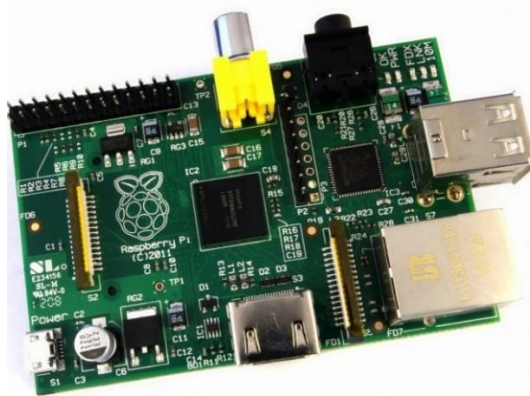
En cuanto a los sistemas empotrados, bajo el capó se sitúa el **controlador de la dirección** figura 3.3(a), que se compone de una placa que integra un microcontrolador *Atmel* de 8 bits y una unidad *Pololu High-Power Motor Driver 18v25 CS*.

El coche también dispone de un ordenador de placa reducida ubicado en su parte frontal, denominado **SBC Raspberry Pi** figura 3.3(a), basado en un procesador *ARM11* de 32 bits con 512 MB de memoria RAM. Utiliza un sistema operativo adaptado

para este tipo de dispositivos distribuido por *Linux* y comunica el láser con el PC anfitrión a través de la red Ethernet.



(a) Controlador de la dirección



(b) SBC Raspberry Pi

Figura 3.3-Sistemas empotrados en el eCARM

Por último, el **controlador Curtis PMC modelo 1268-5403 SepEx®**, figura 3.4, que hace de etapa de potencia entre la parte de control y la parte de potencia del vehículo eléctrico. Es un controlador programable basado en un microprocesador, con una sección de potencia MOSFET avanzada para un control uniforme y perfecto de motores de excitación independiente. Es capaz de detectar una amplia cantidad de fallos, leer y controlar múltiples variables de las cuales cabe destacar la entrada del acelerador, operación del interruptor del acelerador y de dirección, voltaje de las baterías, corriente de campo del motor y de la armadura,...

Está fabricado bajo un sistema de gestión de la calidad certificado según las normas ISO 9001, tiene una capacidad de 400 amperios/2 minutos para la corriente nominal de la armadura y 50 amperios/2 minutos para la corriente nominal del campo.



Figura 3.4-Controlador Curtis 1268-5403

3.2.2. TARJETAS DE E/S

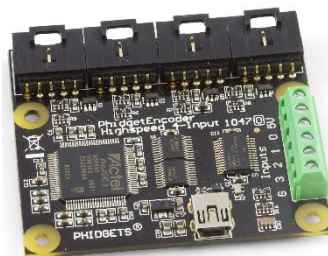
Aunque algunos sensores pueden conectarse directamente a los ordenadores PC1 y PC2 a través de puertos USB, o bien, cablearse hasta alguno de los sistemas empotrados; otros muchos necesitan de dispositivos intermedios para comunicarse con cualquiera de los ordenadores, es decir, las tarjetas de entrada/salida denominadas: *NI USB-6211* y *PhidgetEncoder HighSpeed 4-Input*.

La tarjeta de adquisición de datos (DAQ) de *National Instrument NI USB-6211*, figura 3.5(a) permite la conexión de hasta 16 entradas analógicas unipolares (8 en modo diferencial) y 2 salidas analógicas con una tasa de comunicación de 16 bits a 250 kS/s. También cuenta con terminales para lectura/escritura de señales digitales, 4 de salida y 4 de entrada, o su uso como contador (2 máx.). Se comunica con el ordenador industrial mediante USB y en la misma se encuentran conectados:

- Entradas analógicas (modo unipolar):
 - 3 Voltímetros *MRC*,
 - 1 Amperímetro *Honeywell*,
 - 3 Amperímetro *LEM*,
 - 3 Sensores de temperatura *LM335AZ*,
 - 1 conexión con Caja *Tesur* para leer el voltaje dado por el pedal del acelerador en modo manual.
- Salidas analógicas:
 - 1 conexión con la Caja *Tesur* para la consigna del acelerador en modo automático.
- Entradas digitales: Ninguna.
- Salidas digitales:
 - 1 conexión con la Caja *Tesur* para la respuesta del controlador "rápido/lento",
 - 1 conexión con la Caja *Tesur* para la marcha "adelante/atrás".



(a) NI USB-6211



(b) PhidgetEncoder HighSpeed 4-Input



(c) Claraquino v1.0

Figura 3.5-Tarjetas de E/S en el eCARM

Por otro lado, la tarjeta **PhidgetEncoder HighSpeed 4-Input** figura 3.5(b) comercializada por *Phidgets Inc.* ofrece la posibilidad de leer un máximo de 4 encoders o codificadores de señal en cuadratura y 4 señales digitales. Actualmente, la tarjeta se encarga de transmitir al PC1 por medio de puerto USB la información recibida de los 2 encoders *Phidgets* (ruedas traseras) y del encoder *SICK* (sistema de dirección).

Para terminar, en el maletero puede localizarse, junto con las otras dos tarjetas, una plataforma de hardware y software libre para experimentación y desarrollo basada en un microcontrolador *Atmel*, cuyo diseño e implementación se ha realizado en la Universidad de Almería (UAL): el **Claraquino v1.0** figura 3.5(c). Éste está cableado al ordenador embebido a través de USB y sirve para sincronizar las cámaras.

3.2.3. SENSORES.

En lo sucesivo, se detallan las características de cada uno de los sensores instalados en el *eCARM* que se encargan de recoger datos para transmitírselos al sistema de control.

Como se puede intuir según la tabla 3.2, para conocer la orientación del vehículo (Yaw, Pitch, Roll), su velocidad angular y su aceleración lineal X, Y, Z se ha instalado en el centro de gravedad del mismo una unidad de medida inercial, denominada **IMU Xsens MTI 300** figura 3.6(a) que se conecta mediante USB al PC2.



(a) IMU Xsens MTI 300



(b) GPS Hemisphere Crescent R100

Figura 3.6-Sensores en el *eCARM* (IMU y GPS)

Por otro lado, la posición del coche se detecta por medio de un sistema de posición global (GPS), esto es, un **GPS Hemisphere Crescent R100 Series Receiver** figura 3.6(b) cuya antena se encuentra en el techo y cuyo receptor, que enlaza con el PC1 a través del puerto USB, se ubica tras el reposacabezas del copiloto. La baja frecuencia de muestreo no permite su uso por si solo en bucles de control de cierta rapidez, sin embargo resulta de vital importancia para conocer la situación del vehículo respecto al sistema de referencia geográfico.

En la zona frontal, encima de la placa de matrícula, se halla el **láser SICK LMS200** figura 3.7(a) cuya misión principal es la detección de obstáculos dentro de su radio de alcance, 81 m en un ángulo de 180 grados. Otras de las tareas para las que se puede emplear son la reconstrucción de entornos y la medida de la posición y velocidad del vehículo en combinación con otros sensores. Este se comunica con la arquitectura software a través de la *Raspberry Pi*, donde se ejecuta el módulo encargado de controlar su funcionamiento.

Sobre el parabrisas se sitúan dos **cámaras Flea3 FL3-U3-13E4C-C** figura 3.7(b) que ejercen de par estereoscópico sincronizado para el sistema de visión artificial del *eCARM*. La información captada por éstas es retransmitida al ordenador embebido a través de dos puertos USB 3.0, lo que permite una frecuencia de muestreo de hasta 80 Hz. Sus aplicaciones fundamentales son parecidas a las del láser, como sistema de odometría visual y reconstrucción de entornos.



(a) Láser SICK LMS200



(b) Cámaras Flea3 FL3-U3-13E4C-C

Figura 3.7-Sensores en el *eCARM* (láser y cámaras)

Para la dirección del vehículo se emplea un **encoder SICK DFS60B-S1PA10000** figura 3.8 (a), de tipo incremental, acoplado a la columna de dirección que evalúa el giro realizado por el volante. La señal del codificador es leída tanto por el puerto número dos de la *PhidgetEncoder HighSpeed 4-Input* como por el sistema empotrado que constituye el controlador de la dirección.

Mientras, en las ruedas traseras, dos **encoders Phidgets IHC3808** figura 3.8(b) se ocupan de medir la velocidad del *eCARM* y de obtener los datos necesarios para determinar la odometría del mismo. Trabajan a una velocidad máxima de 4500 rpm, con una resolución de 360 pulsos por revolución y alimentados con corriente continua a una tensión de 5V. Además, se encuentran conectados a los puertos 0 (rueda derecha) y 1 (rueda izquierda) de la tarjeta de *Phidgets*.



(a) Encoder SICK DFS60B-S1PA10000



(b) Encoders Phidgets IHC3808

Figura 3.8-Sensores en el eCARM (encoders)

Con respecto a los sensores de corriente, fundamentales en el proceso de modelado de las baterías, se han instalado dos clases de amperímetros: 1 **amperímetro Honeywell CSLA2EL** figura 3.9(a), a la salida de las baterías; y 3 **amperímetros LEM DHR 100** figura 3.9 (b), dos en el motor y uno a la salida de las baterías. La razón de que se empleen dos tipos de sensores se debe a que el modelo *LEM* no detecta el sentido de la corriente, el cual es necesario conocer para determinar si se está produciendo la carga o descarga de las baterías. Las señales analógicas de cada uno de los amperímetros pasan a través de la tarjeta *NI USB-6211* y son registradas por el PC2.



(a) Amperímetro Honeywell CSLA2EL



(b) Amperímetro LEM DHR 100

Figura 3.9- Sensores en el eCARM (amperímetros)

Con el fin de realizar un seguimiento del consumo energético del vehículo y modelar las baterías se han cableado hacia el maletero 3 voltímetros *MCR-VDC-UI-B-DC-2811116* figura 3.10(a), dos de ellos miden el voltaje de entrada al rotor y al estator del motor y otro el de salida de las baterías.

Por seguridad de las baterías (especialmente durante la carga) y para el modelado de las baterías se han instalado 3 sensores de temperatura *LM335AZ* figura 3.10(b), dos en unos bornes de las baterías y otro alejado del cubículo de las baterías y del motor, con el objetivo de medir la temperatura ambiente sin que se vea

influenciada por la temperatura propia de las baterías o del motor. Igual que para los amperímetros, las señales analógicas de cada uno de los sensores pasan a través de la tarjeta *NI USB-6211* y son registradas por el PC2.



(a) Voltímetro MCR-VDC-UI-B-DC-2811116



(b) Sensor de temperatura LM335AZ

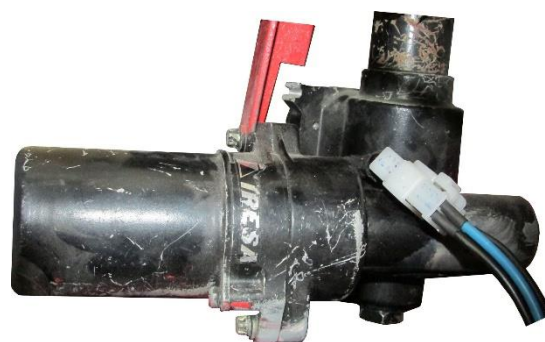
Figura 3.10-Sensores en el eCARM (voltímetro y sensor de temperatura)

3.2.4. ACTUADORES

A partir de la información generada por los sensores, la parte lógica del vehículo emite órdenes que se hacen efectivas en los actuadores del coche, éstos son (figura 3.11), el motor de impulsión *XQ-4.3* y el motor de la dirección asistida eléctrica marca *IRESA*.



(a) Motor de impulsión XQ-4.3



(b) Motor de la DAE

Figura 3.11- Actuadores en el eCARM

El primero de ellos se trata de un motor de excitación en paralelo, con clase de aislamiento H y una potencia de 4,3 kW, que se alimenta directamente de las baterías a una tensión continua de 48 V. Está gobernado por el controlador *Curtis* cableado hasta la Caja *Tesur*, donde se encuentra habilitadas las señales digitales correspondientes al sentido de la marcha y velocidad de respuesta del controlador; y las señales analógicas para los modos manual y automático del acelerador. Se halla bajo el capó del vehículo, ensamblado al palier de las ruedas delanteras a través de una caja reductora y del diferencial.

Del segundo motor, en cambio, se sabe poco a parte de su tensión de alimentación que es de 12V DC. Está unido a la columna de dirección mediante un embrague eléctrico que actúa al mismo voltaje y que permite su acople/desacople según se trabaje en modo automático o manual.

3.2.5. DIAGRAMA DE CONEXIONES

A modo de resumen, se presenta el siguiente esquema:

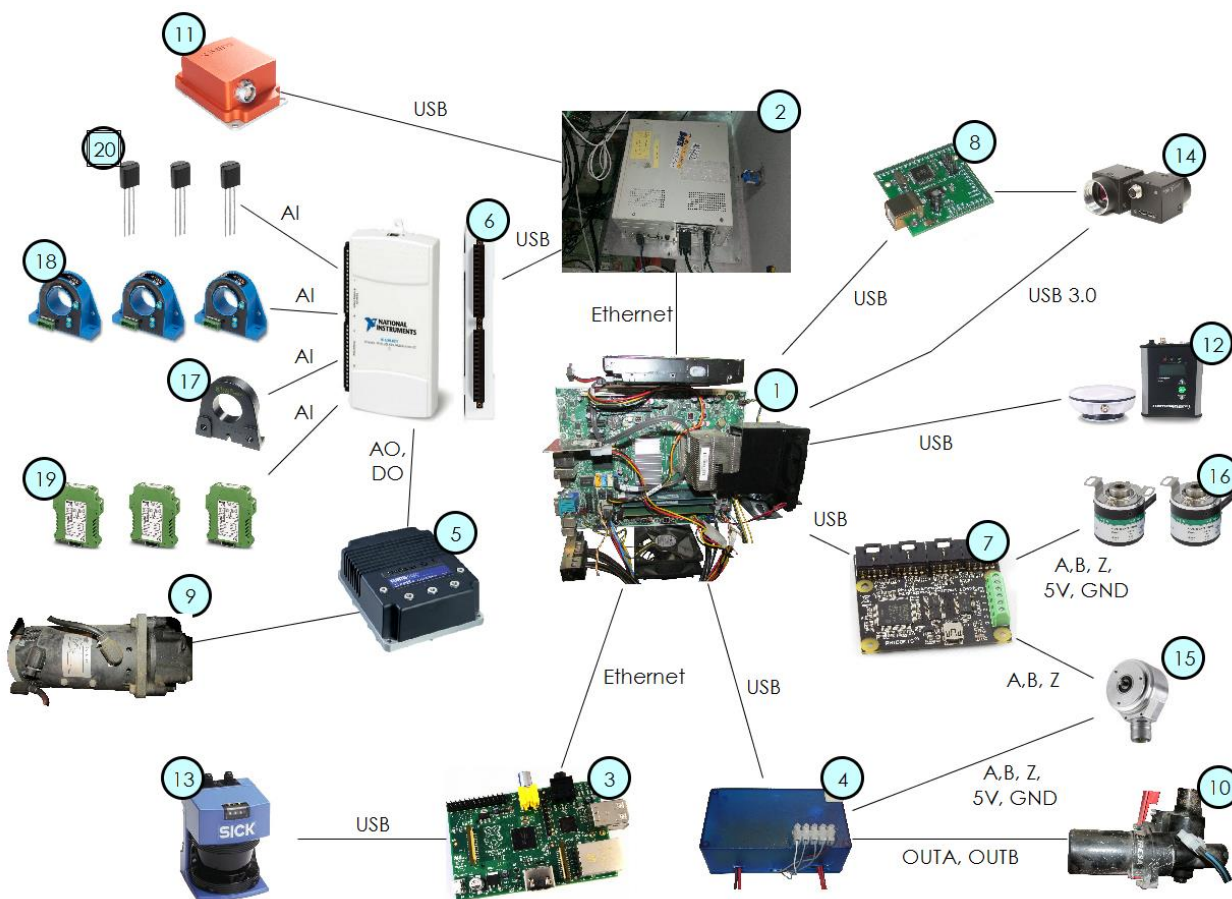


Figura 3.12-Diagrama de conexiones de los componentes hardware del eCARM

3.1. ARQUITECTURA SOFTWARE

A la forma en que se organiza la estructura global del sistema lógico del robot se la conoce como arquitectura software, siendo los tipos más comunes en informática los que se citan a continuación [23]: plana, monolítica, cliente-servidor, arquitectura multicapa o en tres niveles, peer to peer, en pipeline, orientada a servicios, dirigida por eventos, de sistemas holónicos, de pizarra y directa. En el caso del eCARM, éste hace uso de una arquitectura de tipo pizarra denominada *OpenMORA* [24], derivada de la expresión *Open Mobile Robot Architecture*. En los apartados subsiguientes se expone el sistema lógico del que dispone el vehículo: su arquitectura y lista módulos.

3.1.1. OPENMORA

OpenMORA es una arquitectura software para robots móviles basada en la plataforma *MOOS* (*Mission Oriented Operating Suite*) [25] y la herramienta *MRPT* (*Mobile Robot Programming Toolkit*) [26], que proveen de las librerías, aplicaciones y base de comunicaciones necesarias para los algoritmos comúnmente empleados en robótica. Desarrollada a partir del año 2008 hasta la fecha en el área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga, el mantenimiento es realizado en cooperación por la Universidad de Málaga y la Universidad de Almería.

La idea consiste en un programa principal o núcleo que constituye la pizarra, el *MOOSDB* (*MOOS Dashboard*), donde se encuentra publicada toda la información aportada por el resto de módulos, esto son, datos de tipo *double*, *string* de texto y *string* binario. Sólo se requiere ejecutar éste módulo en uno de los ordenadores, en el caso del *eCARM* el PC1 es el encargado de hacerlo. La información se encuentra descentralizada, ya que para acceder a ella cualquier módulo puede suscribirse a las variables publicadas según sus necesidades. Además, la comunicación entre hilos de ejecución se produce a través de sockets siguiendo el protocolo la propia librería *MOOS*.

Actualmente, sobre el *eCARM* se han implementado una serie de módulos, que se verán en el siguiente epígrafe, tanto en capas de bajo nivel —comunicación con sensores, comandos de actuación—; como de alto nivel, verbigracia algoritmos de navegación y planificación. Para hacer uso de ellos, una vez programados y compilados, se emplea la herramienta *pAntler* que lanza el archivo correspondiente a cada uno (*mission*) de extensión **.moos*.

3.1.2. MÓDULOS DEL eCARM

En la tabla 3.3 se presenta una lista con los módulos que componen el software del *eCARM*, junto con una breve descripción de los mismos. El módulo empleado principalmente en este TFG es el módulo *NIDAQ* y *ScopeLogger*, para la visualización y adquisición de señales analógicas de los sensores.

Tabla 3.3: Listado de módulos del *eCARM*.

Nombre	Descripción
<i>ChessboardDetector</i>	Detecta un tablero de ajedrez impreso en papel mediante el par estéreo formado por las cámaras Flea3.
<i>Claraquino</i>	Sirve de interfaz a la placa <i>Claraquino v1.0</i> conectada por USB.
<i>eCarOdometry</i>	Calcula la odometría del coche con los datos dados por los encoders <i>Phidgets</i> de las ruedas traseras.
<i>GenericSensor</i>	Utiliza la aplicación <i>CGenericSensor</i> de la herramienta <i>MRPT</i> para acceder a un sensor cualquiera y publicar sus datos de manera oportuna.

Nombre	Descripción
<i>IMU_XSens</i>	Sirve de interfaz al dispositivo IMU <i>XSens</i> a través del protocolo MT4.
<i>JoystickControl</i>	Permite manejar el robot por medio de un teclado o una palanca de mando.
<i>LocalizationFusion</i>	Realiza un seguimiento en tiempo real de la posición de forma precisa, fusionando la información de varias fuentes.
<i>LocalizationPF</i>	Ejecuta el algoritmo de localización de Monte-Carlo partiendo de un mapa del entorno.
<i>MobileRobot_Pioneer</i>	Sirve de interfaz con un sistema base de robótica móvil.
<i>MobileRobot_Simul</i>	Consiste en la simulación de un robot móvil equipado con láser, s3n3n y sensor de infrarrojos en un entorno 2D.
<i>NavigatorReactivePTG</i>	Consiste en un sistema de navegaci3n reactiva gen3rico.
<i>NIDAQ</i>	Sirve de interfaz a la tarjeta de adquisici3n <i>NI USB-6211</i> .
<i>ScopeLogger</i>	Permite la visualizaci3n y almacenamiento de las se3ales provenientes de la <i>DAQ</i> y suministradas por el modulo <i>NIDAQ.moos</i>
<i>PhidgetEncoders</i>	Sirve de interfaz a la tarjeta <i>PhidgetEncoder HighSpeed 4-Input</i> .
<i>RobotGUI</i>	Sirve de interfaz gr3fica de usuario para visualizar y manipular el robot.
<i>SteerControllerLowLevel</i>	Sirve de interfaz al sistema empotrado encargado de controlar la direcci3n.
<i>StereoFlyCap</i>	Sirve de interfaz al par est3reo conectado al <i>Claraquino v1.0</i> y permite su sincronizaci3n.
<i>StereoOdometry_libviso</i>	Calcula la odometr3a del coche a partir de informaci3n visual empleando la librer3a <i>libviso2</i> .

La ejecuci3n del m3dulo *NIDAQ* se lleva a cabo en el PC2, y permite mediante las diferentes tareas el control sobre las entradas y salidas, tanto anal3gicas como digitales, que ofrece la tarjeta de adquisici3n *NI USB-6211*.

CAPÍTULO 4. ESTADO DEL ARTE

4.1. MODELADO DE LAS BATERÍAS

4.1.1. INTRODUCCIÓN

A efectos de control automático y eficiencia energética no basta con tener una materia prima que ofrezca muy buenas prestaciones energéticas, es decir; unas baterías de gran capacidad, durabilidad, eficiencia, poco peso, poco volumen, etc. A menos que se descubra la fuente de energía infinita portátil, existe la necesidad de conocer el estado de las baterías y su comportamiento en base al uso a lo largo del tiempo.

Extrapolando esta necesidad al vehículo eléctrico, es fundamental obtener un modelo del conjunto de baterías que suministran la energía. De hecho, existen grandes cantidades de modelos, desde el más simple, que contiene una impedancia colocado en serie con una fuente de tensión, hasta la más compleja.

En general, estos modelos representan la batería como un circuito eléctrico compuesto por resistencias, capacidades y otros elementos, constante o variable (en función de la temperatura o el SOC) [16].

4.1.2. PUNTO DE PARTIDA

El modelo más simple de una batería de plomo-ácido se compone de una fuente de tensión en serie con una impedancia figura 4.1.

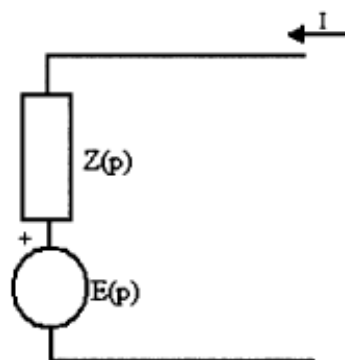


Figura 4.1-Circuito equivalente simple.

Dado que el comportamiento de las baterías dista mucho de ser lineal, y la eficiencia de la carga no es del 100%, ha de implementarse un modelo más completo. Por ello, se ha tomado como base 3 artículos científicos que plantean un modelado de las baterías de Pb-ácido formado por una rama principal a base de bloques R-C y otra rama parásita, figura 4.2.

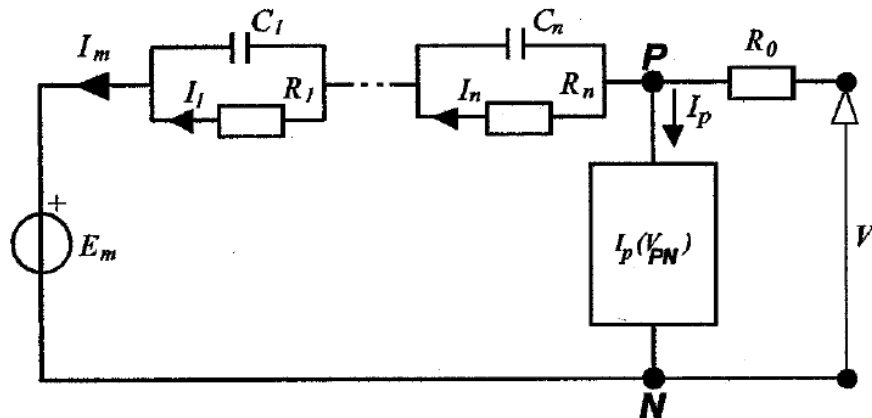


Figura 4.2-Modelo general de las baterías de Pb-ácido

Dichos artículos son los que se detallan a continuación:

- **“Charge and Discharge Fourth Order Dynamic Model of the Lead Acid Battery”**

Este artículo propone un modelo matemático, que se corresponde a un sistema de ecuaciones diferenciales de 4^{to} orden y otras ecuaciones algebraicas, para la simulación del comportamiento de las baterías frente a los procesos de carga y descarga.

Fecha de publicación: 1990

Autores: -Giglioli, R. (Universidad de Pisa, Italia).
 -Buonarota, A. y Menga, P. (ENEL-D.S.R., Italia).
 -Ceraolo, Massimo (C.R.I.T.A., Italia).

Véase [17].

- **“New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries”**

Este otro artículo trata de la implementación de un modelo de 3^{er} orden, que presenta un buen compromiso entre la complejidad del modelo y la precisión de los resultados. Precisamente por ese compromiso entre la complejidad y precisión, es porque se ha adoptado este modelo para la simulación del comportamiento de las baterías.

Fecha de publicación: 4 de noviembre, 2000.

Autores: -Ceraolo, Massimo (Investigador del Departamento de sistemas eléctricos y automatización de la Universidad de Pisa, Italia).

Véase [18][17].

- **“Dynamical Models of Lead-Acid Batteries: Implementation Issues”**

Este artículo habla sobre cómo implementar el modelo de 3^{er} orden propuesto en el artículo anterior, trata temas como la elección de un modelo adecuado, la obtención de los parámetros de la capacidad de la batería, parámetros del modelo térmico, etc.

Fecha de publicación: 1 de mayo, 2002.

Autores: -Stefano Barsali (Investigador en el campo de sistemas eléctricos de potencia en la Universidad de Pisa, Italia).

-Ceraolo, Massimo (Investigador y profesor asociado en sistemas eléctricos de potencia de la Universidad de Pisa, Italia).

Véase [17].

A continuación, se detalla las características y ecuaciones del modelo utilizado en el modelado y simulación del comportamiento de las baterías de Pb-ácido del vehículo eléctrico.

4.1.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE LAS BATERÍAS

La idea principal detrás del modelo que se presenta en este trabajo es simular el comportamiento de las baterías por medio de una analogía eléctrica, es decir, utilizar las redes compuestas formalmente por los componentes eléctricos habituales: fuente de tensión, resistencias, condensadores, bobinas, etc.

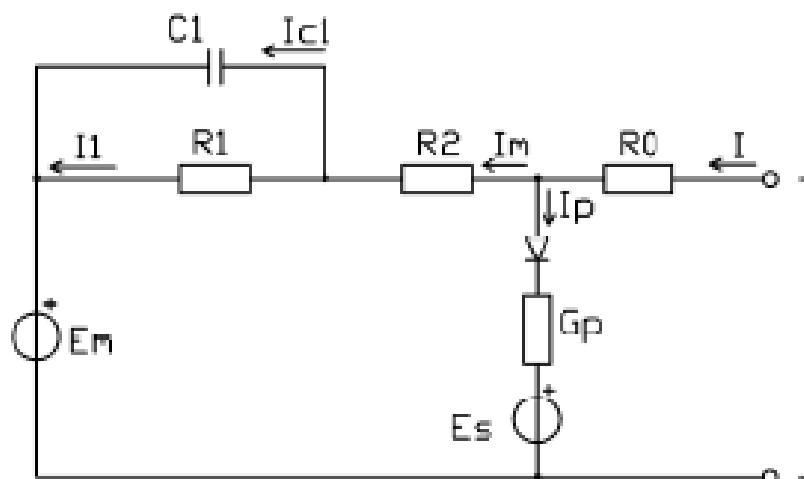


Figura 4.3-Circuito equivalente

A través de este modelo eléctrico se caracteriza el comportamiento de las baterías visto desde los terminales de la misma, el cual dista mucho de ser lineal, al ser los parámetros del modelo fuertemente dependientes del SOC y la temperatura de las baterías, como se verá a continuación.

El circuito eléctrico equivalente (figura 4.3) se divide en dos ramas:

- La *rama principal* (reversible), que describe la dinámica principal de las baterías en las mayoría de las condiciones
- La *rama parásita* (irreversible), que sirve para simular que la eficiencia de la carga de las baterías no es del 100 %.

La rama principal está formada por bloque R/C en serie con una resistencia (figura 4.3). La rama parásita situada entre los nodos P y N, según el artículo del [19], presenta un valor de corriente muy pequeño durante el proceso de descarga, próximo a cero, se ha de tener en cuenta en el proceso de carga, al final de la misma.[22]

4.1.4. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MODELO

El modelo de las baterías viene definido por tres variables principales, que influyen fuertemente en el comportamiento de las baterías: el voltaje, la temperatura y el estado de carga. Por consiguiente, se puede dividir el modelo en tres subsistemas: el sistema eléctrico, el sistema térmico y el sistema estimador de carga. En la figura 4.4 se muestra un diagrama de bloques del modelo que refleja dicha división y las relaciones entre los sistemas.

La entrada al modelo es la corriente de la batería (negativa para la descarga y positiva para la carga) y la salida propiamente dicha del modelo es el voltaje, pero como fruto de las ecuaciones expuestas más abajo se puede obtener otros parámetros característicos de la batería como la temperatura del electrolito, SOC, DOC y la carga extraída/inyectada cuyo cálculo es directo en base a la intensidad de la batería.

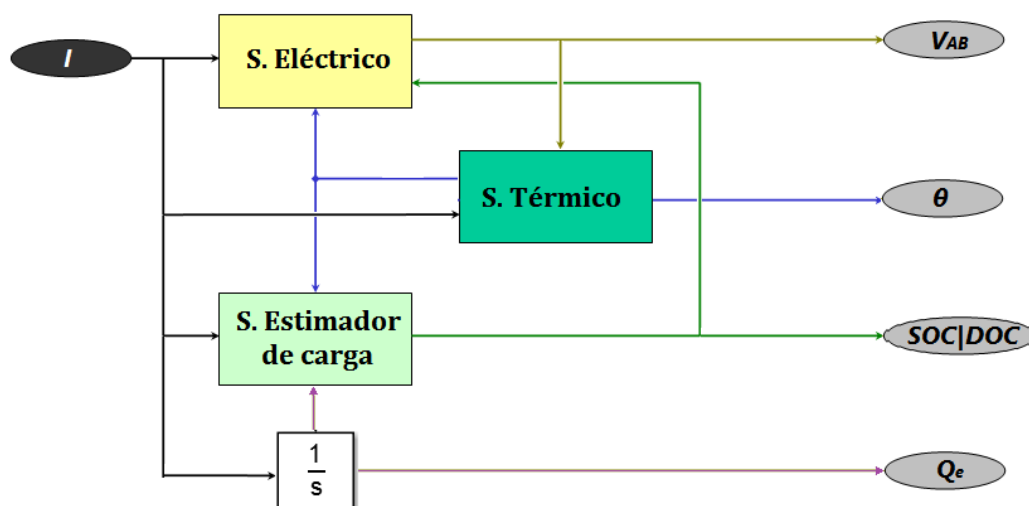


Figura 4.4-Diagrama de bloques del modelo dividido en subsistemas

4.1.5. DEFINICIÓN DE ECUACIONES Y CONSTANTES

En este apartado se realiza una descripción desde el punto de vista de las ecuaciones que definen el modelo de 3^{er} orden.

4.1.5.1. Fuente de tensión de la rama principal (E_m)

La ecuación (4.1) describe el comportamiento de la fuerza electromotriz interna, o tensión de circuito abierto de la batería:

$$E_m = E_{m0} - k_e(273 + \theta)(1 - SOC) \quad (4.1)$$

Donde:

- E_m –es la tensión de circuito abierto en voltios (V).
- E_{m0} –es la tensión de circuito abierto a plena carga en V.
- k_e –es una constante del modelo en V/°C.
- θ –es la temperatura de las baterías en °C.
- SOC –es el estado de carga en %.

4.1.5.2. Resistencia vista en los bornes R_0

La ecuación (4.2) describe la resistencia vista en los bornes de las baterías. Esta resistencia se considera constante respecto a la temperatura, pero variable con el SOC.

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)] \quad (4.2)$$

Donde:

- R_0 –es la resistencia vista en los bornes en Ω .
- R_{00} –es una constante del modelo en Ω .
- A_0 –es una constante del modelo adimensional.

4.1.5.3. Resistencia R_1 de la rama principal

La ecuación (4.3) describe una resistencia de la rama principal del modelo eléctrico. Esta resistencia varía con el DOC, aumentando de forma exponencial a medida que se agota la batería durante el proceso de descarga:

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad (4.3)$$

Donde:

- R_1 –es una resistencia de la rama principal en ohmios (Ω).
- R_{10} –es una constante del modelo en Ω .
- DOC –es la profundidad de carga en %.

4.1.5.4. Resistencia R_2 de la rama principal

La ecuación (4.4) describe una resistencia de la rama principal del modelo eléctrico. Esta resistencia varía con el DOC, aumentando de forma exponencial a medida que se agota la batería durante el proceso de descarga:

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp[A_{21}(1 - SOC)]}{1 + \exp\left(A_{22} \left|\frac{I_m}{I^*}\right|\right)} \quad (4.4)$$

Donde:

- R_2 –es una resistencia de la rama principal en Ω .
- I_m – es la intensidad que recorre R_2 en amperios (A).
- I^* –es la intensidad nominal o la intensidad de descarga entorno a la cual se optimiza el modelo, en A.
- R_{20} –es una constante del modelo en Ω .
- A_{21} –es una constante del modelo adimensional.
- A_{22} –es una constante del modelo adimensional.

4.1.5.5. Intensidad de la rama parásita I_{PN}

La ecuación (4.5) describe la perdida de corriente durante la carga de la batería. Esta corriente depende de la temperatura y de la caída de tensión en la rama parasita, presentando valores muy pequeños en la mayoría de las condiciones, salvo para valores altos de SOC durante la carga [22].

$$I_{PN} = V_{PN} G_p; \quad G_p = G_{p0} \exp\left(\frac{V_{PN}}{V_{p0}} + A_p \left(1 - \theta/\theta_f\right)\right) \quad (4.5)$$

Donde:

- I_{PN} –es la intensidad que recorre la rama parásita en A.
- V_{PN} – es la tensión en la rama parásita en V.
- G_{p0} – es una constante del modelo en segundo
- V_{p0} – es una constante del modelo en V.
- A_p –es una constante del modelo adimensional.
- θ_f – es la temperatura de congelación del electrolito en $^{\circ}\text{C}$.

4.1.5.6. Ecuaciones diferenciales del modelo.

En el modelo tenemos implicadas 3 ecuaciones diferenciales, las cuales se detallan a continuación:

Carga extraída/inyectada Q_e

La ecuación (4.6) describe la carga eléctrica extraída/inyectada en la batería, uno de los parámetros que mejor se pueden cuantificar y cuya obtención es directa.

$$\frac{dQ_e}{dt} = -I_m \quad (4.6)$$

Intensidad a través de R_1

La ecuación (4.7) es una estimación para la corriente que pasa a través de R_1 , cuya evolución en el tiempo viene determinada por una constante de tiempo característica de la rama principal.

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{\tau_1} (I_m - I_1) \quad (4.7)$$

Donde:

- I_1 –es la intensidad que recorre R_1 en amperios.
- τ_1 –es la constante de tiempo representativa de la evolución en el tiempo de la rama principal.

Temperatura del electrólito θ

La ecuación (4.8) es un modelo para estimar la evolución temperatura debido a la disipación de potencia que se produce internamente en las baterías. El modelo térmico consiste en una función de transferencia de primer orden, cuya constante de tiempo viene determinada por la resistencia y capacidad térmica del conjunto de baterías.

$$C_\theta \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta - \theta_{amb}}{R_\theta} + P_s \quad (4.8)$$

Donde:

- C_θ – es la capacidad calorífica en Julios/°C.
- θ_{amb} – es la temperatura ambiente en °C.
- R_θ – es la resistencia térmica en °C/Watio.
- P_s –es la potencia disipada en la batería en forma de calor en Watio.

4.1.5.7. Ecuaciones algebraicas del modelo.

El circuito electrónico equivalente permite aplicando la leyes de Kirchhoff deducir una serie de ecuaciones necesarias para la implementación del modelo en simulación.

La ecuación (4.9) representa la tensión en los bornes de las baterías, V_{AB} , una de las salidas más importantes del modelo en simulación.

$$V_{AB} = E_m + I_m \cdot R_2 + I_1 \cdot R_1 + I \cdot R_0 \quad (4.9)$$

Donde:

- I – es la intensidad a la entrada de las baterías, ya sea esta la intensidad de descarga o carga.

La ecuación (4.10) representa la potencia disipada internamente en las baterías P_s , es decir, la potencia disipada en los elementos resistivos en forma de calor.

$$P_s = I_1^2 \cdot R_1 + I_m^2 \cdot R_2 + I_2 \cdot R_0 + I_p (V_{PN} - E_s) \quad (4.10)$$

Donde:

- E_s – es la fuente de tensión interna de la rama parásita.

Otras ecuaciones necesarias para la implementación del modelo son la ecuación (4.11) y (4.12), detalladas a continuación:

$$I = I_m + I_p \quad (4.11)$$

$$V_{pn} = V_{ab} - I \cdot R_0 \quad (4.12)$$

4.1.5.8. Capacidad total de las baterías.

La ecuación (4.13) es una aproximación de la capacidad total de las baterías en base a las condiciones de temperatura del electrolito e intensidad de descarga. La dependencia de la capacidad es solo para la intensidad de descarga, para la carga la intensidad se le asigna el valor cero, por lo que solo tendremos variación de la capacidad con la temperatura.

$$C_0(I, \theta) = \frac{K_c C_0^* \left(1 - \frac{\theta}{\theta_f}\right)^\varepsilon}{1 + (K_c - 1)(|I/I^*|)^\delta} \quad (4.13)$$

Donde:

- $C_0(I, \theta)$ –es la capacidad de las baterías en función de la temperatura y la intensidad de descarga.
- C_0^* –es la capacidad de las baterías para la intensidad de descarga entorno a la cual se optimiza el modelo y 0 °C.
- K_c –es una constante del modelo adimensional.
- ε –es una constante del modelo adimensional.
- δ –es una constante del modelo adimensional.

4.1.5.9. Estado de carga SOC y profundidad de carga DOC

Los parámetros SOC y DOC describe la carga disponible en las baterías basándose en la capacidad total disponible. La ecuación (4.14) calcula el estado de carga SOC, que representa cuan llena están las baterías con referencia a la máxima capacidad que estas pueden suministrar a una temperatura dada.

$$SOC = 1 - Q_e/C(0, \theta) \quad (4.14)$$

La ecuación (4.15) calcula la profundidad de carga DOC, que representa cuan llena están las baterías con referencia a la capacidad al actual régimen de descarga, es decir, la fracción de carga *útil* disponible para la intensidad de descarga dada.

$$DOC = 1 - Q_e/C(I_d, \theta) \quad (4.15)$$

Donde:

- I_d –es la intensidad media de descarga del ensayo.

4.1.6. RESULTADOS DE LOS ARTÍCULOS

La curva teórica de descarga a intensidad constante de una batería se corresponde con la observada en la figura 4.5. [19]

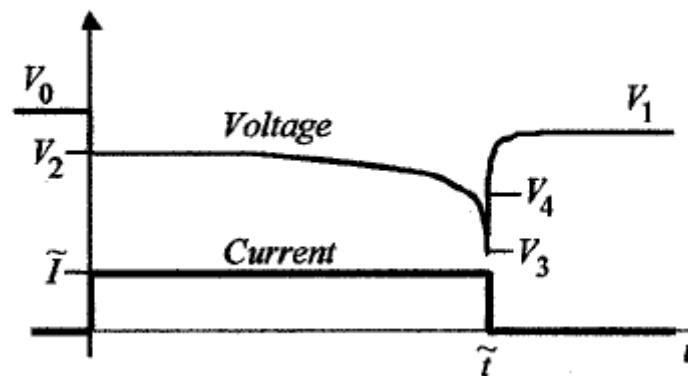


Figura 4.5-Perfil de tensión y corriente para un régimen de descarga a intensidad constante

A continuación, se muestra algunos de los resultados proporcionados por los artículos. [18]

PARAMETERS OF BATTERY 1 (ONLY PARAMETERS NEEDED FOR DISCHARGE SIMULATIONS)

Parameters referring to the battery capacity	$I^* = 51.5 \text{ A}$ $K_c = 1.11$ $\varepsilon = 1.19$	$C_0 = 317.9 \text{ Ah}$ $\theta_f = -40^\circ\text{C}$ $\delta = 1.75$
Parameters referring to the main branch of the electric equivalent	$\tau_I = 7200 \text{ s}$ $K_E = 0.839e-3 \text{ V/}^\circ\text{C}$ $R_{00} = 2.0 \text{ m}\Omega$ $A_0 = -0.20$	$E_{m0} = 2.18 \text{ V}$ $R_{j0} = 0.4 \text{ m}\Omega$
Parameters referring to the battery thermal model	$C_\theta = 15 \text{ Wh/}^\circ\text{C}$	$R_\theta = 0.2^\circ\text{C/W}$

Figura 4.6-Parámetros batería 1

Según estos parámetros del modelo de las baterías, los resultados obtenidos son:

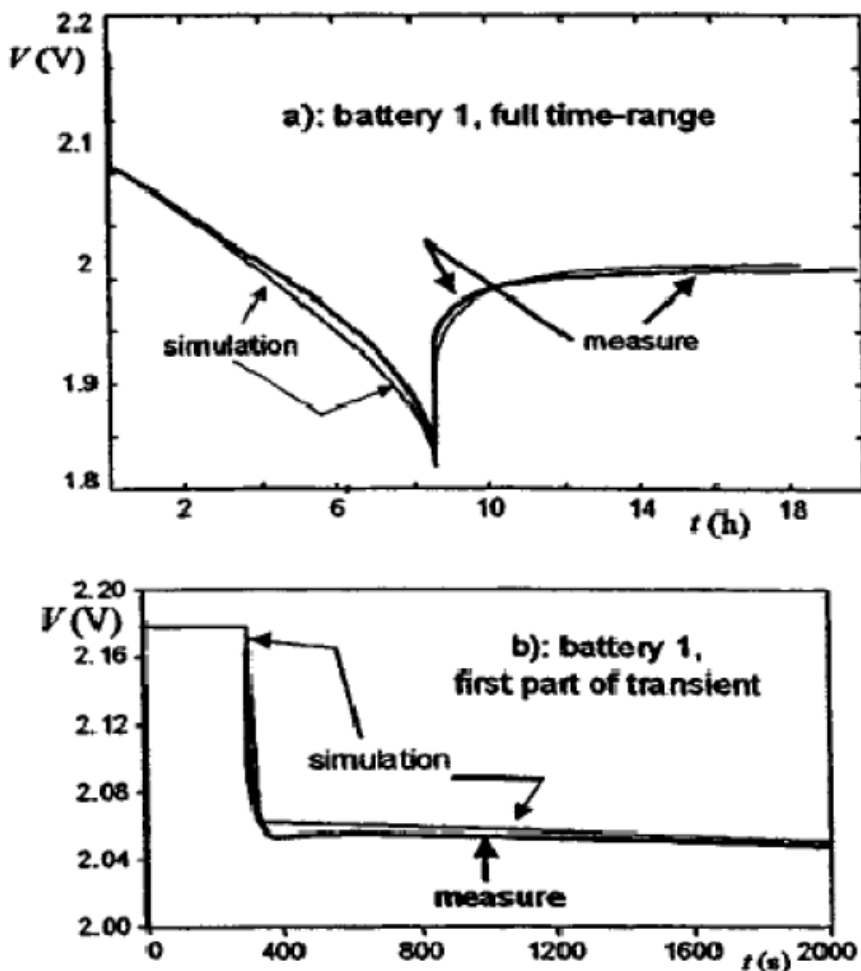


Figura 4.7-Resultados del modelo para la batería 1

PARAMETERS OF BATTERY 2 (ALL PARAMETERS)

Parameters referring to the battery capacity	$I^* = 49 \text{ A}$ $K_c = 1.18$ $\varepsilon = 1.29$	$C_{\theta} = 261.9 \text{ Ah}$ $\theta_f = -40^\circ\text{C}$ $\delta = 1.40$
Parameters referring to the main branch of the electric equivalent	$\tau_f = 5000 \text{ s}$ $K_E = 0.580e-3 \text{ V/}^\circ\text{C}$ $R_{00} = 2.0 \text{ m}\Omega$ $A_0 = -0.30$ $A_{21} = -8.0$	$E_{m0} = 2.135 \text{ V}$ $R_{f0} = 0.7 \text{ m}\Omega$ $R_{20} = 15 \text{ m}\Omega$ $A_{22} = -8.45$
Parameters referring to the parasitic reaction branch of the electric equivalent	$E_p = 1.95 \text{ V}$ $G_{p0} = 2 \text{ pS}$	$V_{p0} = 0.1 \text{ V}$ $A_p = 2.0$
Parameters referring to the battery thermal model	$C_{\theta} = 15 \text{ Wh/}^\circ\text{C}$	$R_{\theta} = 0.2 \text{ }^\circ\text{C/W}$

Figura 4.8-Parámetros batería 2

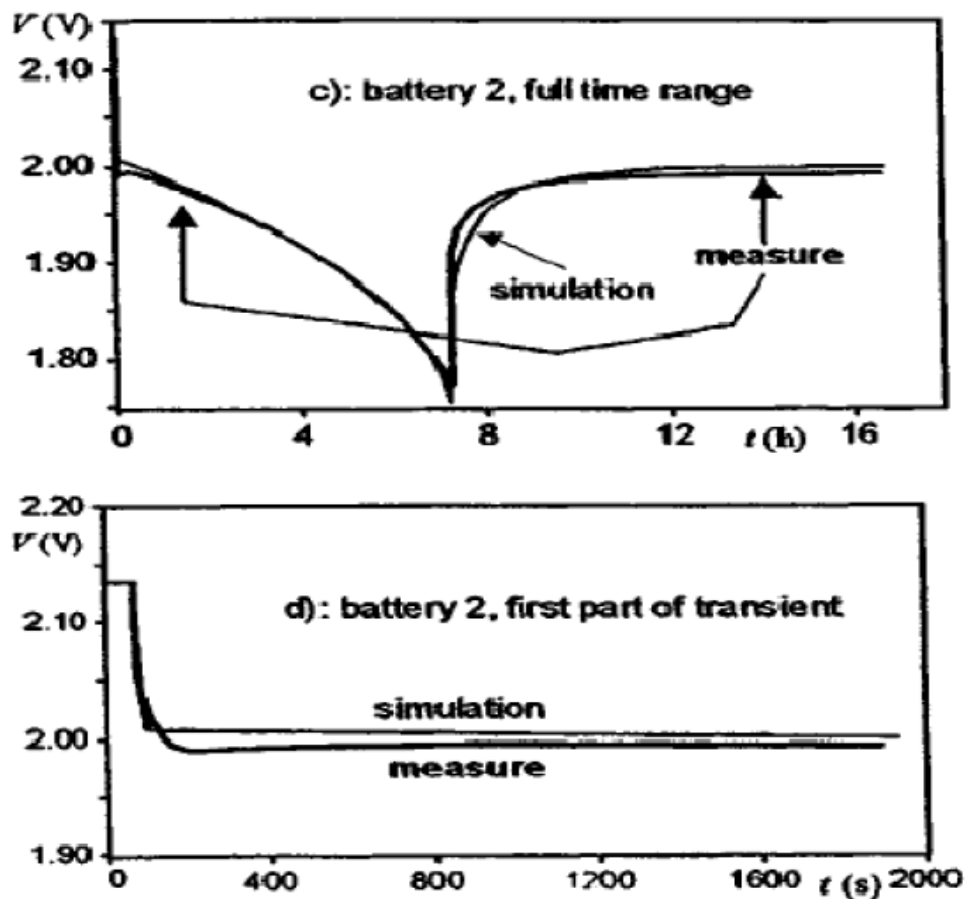


Figura 4.9-Resultados del modelo para la batería 2

4.2. MODELADO DEL CONTROLADOR

4.2.1. INTRODUCCIÓN

El controlador de un vehículo eléctrico es el mediador entre las baterías y el motor para controlar la velocidad y la aceleración del vehículo eléctrico, al igual que lo hace un carburador en un vehículo con motor de gasolina. A diferencia del carburador, el controlador del eCARM también se encarga de invertir la rotación del motor (por lo que el vehículo puede ir marcha atrás) y de convertir el motor en un generador (de modo que la energía cinética de movimiento se puede utilizar para recargar la batería cuando se aplica el freno electromagnético).

Para el control de la aceleración y la velocidad del vehículo, en los primeros vehículos eléctricos con motores de corriente continua se utilizaba una resistencia variable. Con este sistema, en todo momento se extraía la máxima potencia de las baterías por lo que a bajas velocidades, cuando no era necesaria la máxima potencia, se utilizaba una resistencia de alto valor para reducir la corriente suministrada al motor. De esta forma, un gran porcentaje de la energía proporcionada por la batería se perdía en la resistencia, ya que sólo se aprovechaba eficientemente la energía en el movimiento del vehículo a altas velocidades.

Posteriormente, se ha implantado en la industria la modulación por ancho de pulsos de señales eléctricas, también conocida como PWM, (del inglés *Pulse Width Modulation*), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. En el caso que se expone, se considera la segunda opción, siendo la carga el motor DC del vehículo eléctrico.

Por otro lado, para determinar el sentido de giro del motor se ha extendido el uso de circuitos de puente-H, contruidos con interruptores mecánicos o de estado sólido, que conmutan la entrada y la salida de tensión al motor de la forma que puede apreciarse en la figura 4.11.

4.2.2. MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSOS EN MOTORES DC

En el control mediante modulación por ancho de pulsos o PWM, se emplea una señal eléctrica periódica cuadrada en la que se modifica la cantidad de tiempo que el pulso está *on/off*. El parámetro utilizado para ello es el ciclo de trabajo o *duty cycle* (dc), expresado en tanto por cien o tanto por uno la cantidad de tiempo del período que el pulso está activo [27]. De esta forma, para una alimentación de amplitud constante puede variarse el valor de tensión medio de la onda, permitiendo utilizar esto para la regulación de la velocidad motores DC a través de circuitos tanto analógicos como digitales. En la figura 4.10 se representan los parámetros que describen la forma de la onda y la relación entre los mismos en las ecuaciones (4.16) y (4.17).

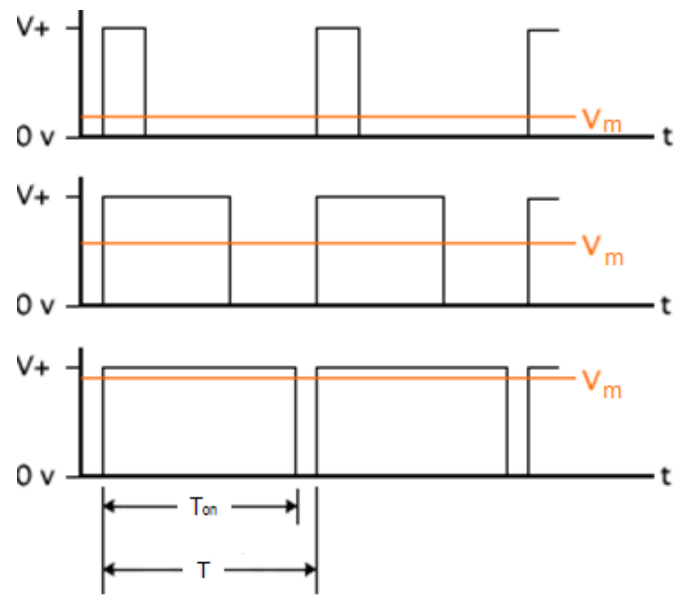


Figura 4.10-Parámetros característicos de la onda PWM

$$dc = \frac{T_{on}}{T} \tag{4.16}$$

$$V_m = V \cdot dc \tag{4.17}$$

4.2.3. ETAPA DE POTENCIA

Como se ha comentado anteriormente, la etapa de potencia adecúa la señal PWM de salida de la parte lógica para que pueda ser utilizada por el motor. Según el manual del controlador *Curtis*, dicha etapa de potencia la constituye un puente H.

El esquema que se denomina puente en H es el que vemos en la figura 4.12, recibe este nombre precisamente por la distribución de los transistores. Esta configuración es una de las configuraciones más utilizada en el control de motores de corriente continua.

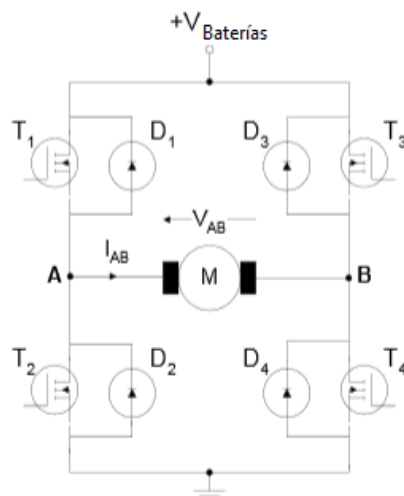


Figura 4.11-Representación esquemática del funcionamiento de un puente en H

Como se observa en la figura 4.11, existen unos diodos, D1 a D4, denominados diodos de libre circulación, de respuesta muy rápida, [31] colocados en antiparalelo con cada uno de los transistores. La función de estos diodos es la de habilitar un camino a la corriente del motor en los momentos en el que los transistores entran en estado de corte, para evitar de esta forma las sobretensiones transitorias que se producirían en esos instantes y que acabarían destruyendo los transistores.

Ha de tenerse en cuenta, que cuando se construye un transistor MOSFETs, siempre se genera un diodo en antiparalelo con él. En el caso de los MOSFETs de potencia, [32] su diseño se cuida de forma especial para que este diodo que aparece de forma intrínseca pueda cumplir con las funciones de los diodos de libre circulación anteriormente mencionados, con lo que no es habitual ni necesario incluir externamente dichos diodos.

El sentido de giro del motor se controla activando y desactivando pares de transistores diagonalmente opuestos. De esta forma, la corriente fluye a través del motor por dos caminos distintos: desde T_1 a T_4 o desde T_3 a T_2 . Según el camino seleccionado, la corriente fluye a través del motor en un sentido u otro, lo que se traduce en un giro horario o antihorario del motor.

4.2.4. MODO DE FUNCIONAMIENTO

El controlador Curtis se encarga de controlar el voltaje aplicado al motor. Las especificaciones ofrecidas en el manual del controlador no aportan datos suficientes para obtener la relación exacta entre las variables de salida y las de entrada. Sólo proporciona información acerca de las prestaciones y de la configuración del mismo, por lo que en este apartado se tratará caracterizar su funcionamiento considerándolo como un sistema del que se conocen uno de sus parámetros (lo cual se denomina en la literatura como caja gris o por su término inglés *greybox* [33]).

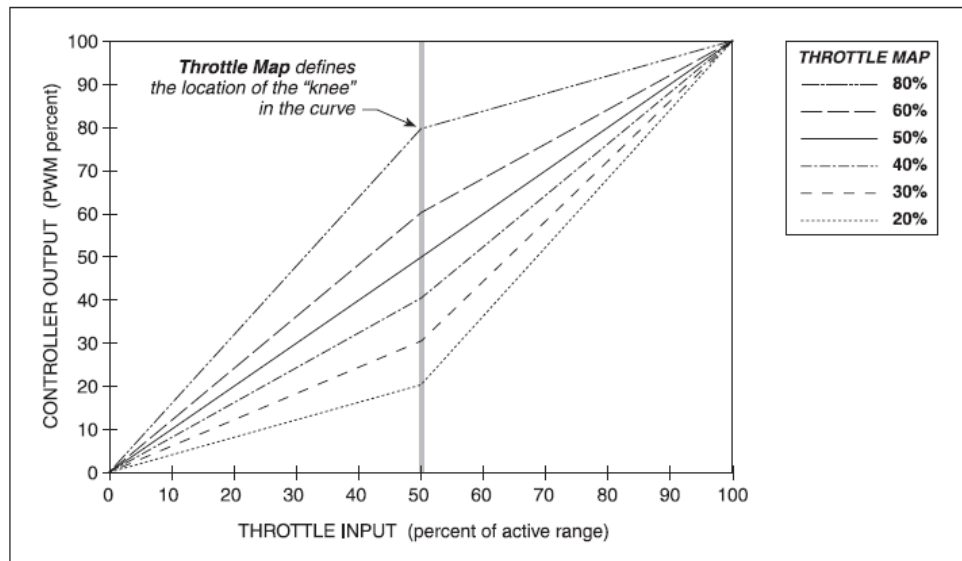


Figura 4.12-Mapa de la aceleración proporcionada por el manual del controlador Curtis

Para empezar, a través del acelerador se envía una señal analógica entre 0-5V de entrada al Curtis que se traduce conforme al mapa de la figura 4.12 en la salida del controlador en forma del ciclo de trabajo (en %) de la señal PWM. Como puede observarse en dicho mapa, la relación entre ambas variables es lineal a trozos.

Por otro lado, el diseño del controlador se ha realizado con la intención de suavizar los escalones de entrada del pedal, limitar la corriente máxima del motor y la velocidad leída a través de un codificador incremental. Esto se hace mediante la aplicación de un filtro en la referencia, por lo que la dinámica del sistema presenta el comportamiento de un sistema de primer orden.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

5.1. ENSAYOS BATERÍAS

5.1.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el procedimiento de obtención del modelo de las baterías. Como se ha comentado con anterioridad, la batería es un sistema electroquímico, por lo que el modelado se puede realizar bajo distintas perspectivas. En este TFG se aborda el modelado, a través de un circuito equivalente cuyos elementos representan los fenómenos presentes en una batería. Dicho circuito equivalente representa al conjunto de baterías que alimentan el vehículo, es decir, en lugar de modelar cada una de las baterías de forma independiente, se modela el conjunto. De esta forma no solo se contempla la resistencia interna de cada batería, sino también la resistencia entre de las conexiones del conjunto. Los parámetros del circuito equivalente se calculan tras realizar ensayos de descarga a intensidad constante. En primer lugar se realiza el cálculo de la capacidad del conjunto de baterías, y a partir de los resultados se procede a identificar los demás parámetros que definen el modelo.

5.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS BATERÍAS A ENSAYO

Las baterías instaladas en el vehículo *eCARM* son ocho baterías *GreenSaver* modelo *SP210-6* (210Ah/5h) conectadas en serie. Algunas de las características del modelo se detallan en la tabla 5.1. Para mayor detalle consultar datasheet [28].

Tabla 5.1- Características de la batería *GreenSaver SP210-6(210Ah/5h)*

Especificaciones técnicas		
Capacidad nominal		
Tasa descarga 20 horas	12.5A a 5.25V	250Ah
Tasa descarga 10 horas	23A a 5.25V	230Ah
Tasa descarga 5 horas	42A a 5.25V	210Ah
Tasa descarga 2 horas	90A a 5.25V	180Ah
Rango de temperatura de funcionamiento		
Descarga	-35° (-31°F) ~ 50°C (122°F)	
Carga	-15° (5°F) ~ 40°C (104°F)	
Almacenamiento	-15° (5°F) ~ 40°C (104°F)	

5.1.3. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Para la obtención de los parámetros del modelo se realiza una serie de ensayos de descarga a intensidad constante seguidos de su correspondiente carga, mientras se monitoriza el voltaje, la intensidad y temperatura de las baterías.

Se ha aprovechado el motor DC del vehículo para realizar la descarga de las baterías, aunque para una mejor precisión y un rango más amplio de descarga se debería utilizar un dispositivo con carga electrónica programable, lo cual permite una intensidad de descarga constante en todo momento. Utilizar el motor como carga para los ensayos ofrece una ventaja importante, la de no producir sobredescargas en las baterías (el motor se detiene antes de agotar más de lo debido las baterías).

Para la carga se ha empleado el propio cargador del coche, el cual presenta un perfil variable de intensidad, de tal manera que realiza la carga completa de las baterías sin producir daños por sobrecarga.

Antes de establecer el modo operandi de los ensayos, se han realizado una serie de descargas para conocer los límites entre los que el motor descarga las baterías a intensidad constante, comportamiento del vehículo en los ensayos, temperaturas, etc.

A continuación se detalla uno de los primeros ensayos realizados, el cual aporta una valiosa información sobre el comportamiento y estado de las baterías. Se ha tomado muestras del voltaje en cada batería, y de la temperatura en varios elementos del coche.

Para la medición de la temperatura se ha utilizado un sensor de infrarrojos. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.2. La referencia de temperatura ambiente durante la realización del ensayo se establece en torno a 28°C.

Tabla 5.2-Comportamiento térmico de los elementos del eCARM

Tiempo	Baterías	Caja engranaje	Motor	R. Izquierda	R. Derecha
11 min.	28°C	40°C	44.5°C	33°C	34.5°C
47min.	29°C (*)	52°C	54°C	33°C	36°C
1.5 horas	27°C (*)	53°C	55°C	29.5°C	35°C
2.5 horas	27°C (*)	53°C	54°C	28.5°C	36°C
3.5 horas	27°C (*)	53°C	54°C	27°C	36.5°C

(*) No se contempla la temperatura de dos de las baterías, ver discusión a continuación.

La temperatura a lo largo de todo el ensayo se ha mantenido dentro de unos niveles aceptables, con aumentos de temperatura justificados por el propio funcionamiento. Pero transcurridos 45 minutos del ensayo dos de las baterías presentan valores de temperatura inesperados (33-38°C) en comparación con las demás, lo cual es un indicio de alguna anomalía en estas baterías. Antes de justificar

dicha anomalía, en la figura 5.1, figura 5.2 y figura 5.3 se presentan los valores de tensión de cada una de las ocho baterías que alimentan el vehículo eCARM.

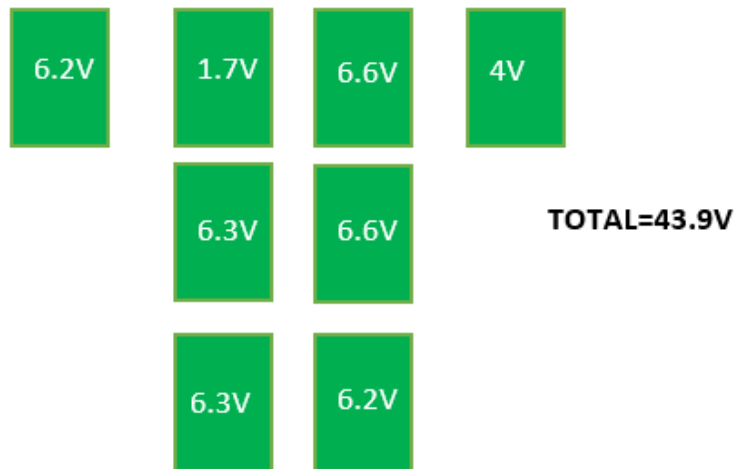


Figura 5.1-Voltaje de las baterías transcurridos 45 minutos

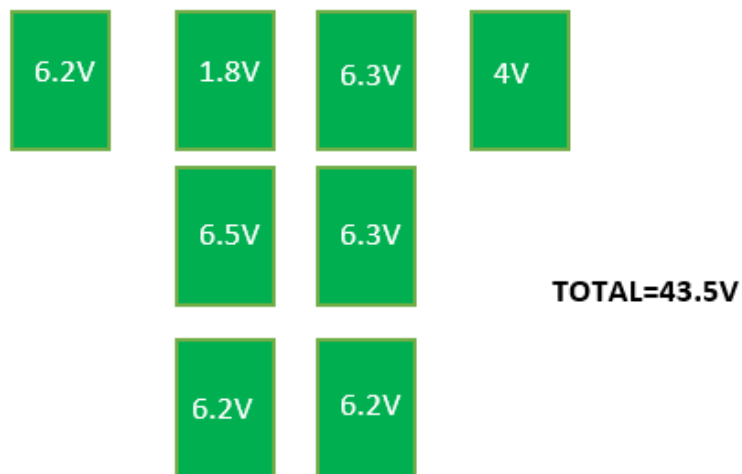


Figura 5.2-Voltaje de las baterías transcurridos 3 horas

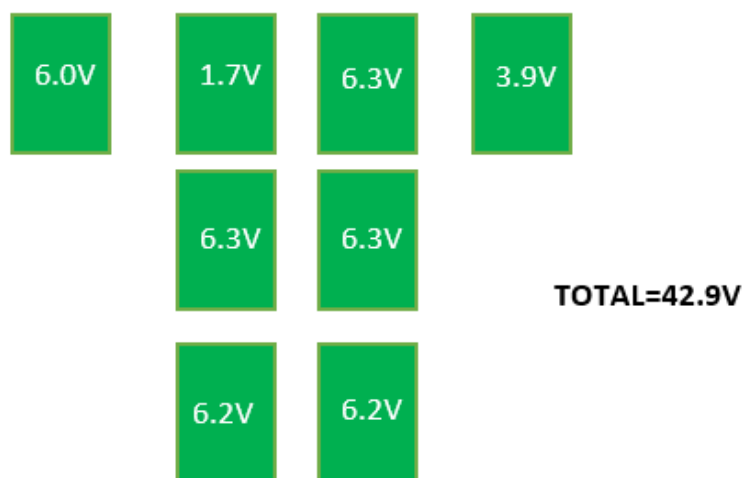


Figura 5.3-Voltaje de las baterías transcurridos 4 horas

En la medida del voltaje se vuelve a tener valores anómalos en esas dos baterías, con lo cual se tienen dos baterías en mal estado, que no son capaces de suministrar la energía suficiente antes un uso más intensivo, y por ello se deben reemplazar lo antes posible (hecho que no ha sido posible durante este TFG).

Conocidas las limitaciones de tiempo e intensidad de descarga constante, además de las particularidades comentadas anteriormente, se establecen los pasos a seguir para la realización de los ensayos. Cada ensayo se compone de una descarga seguido de su correspondiente carga. Los pasos a seguir son:

1. Inmovilizar el coche de tal manera que permita el funcionamiento del motor, es decir, el libre movimiento de las ruedas motrices.
2. Se parte de las baterías completamente cargadas, supuesto cuando el cargador no inyecta más intensidad de carga en estas.
3. Se inicia la grabación de las variables a monitorizar, tensión, intensidad y temperatura utilizando los módulos *.moos* correspondientes.
4. Se aplica carga a las baterías poniendo en marcha el motor a un régimen de trabajo constante. Para ello se manda, desde la pizarra del *MOOSDB (MOOS Dashboard)*, una consigna de pedal (acelerador) constante al controlador Curtis, que hace de medio entre la alta potencia que pone en movimiento el motor y la baja potencia de la parte lógica.
5. Transcurrido el tiempo de descarga establecido para el ensayo, se vuelve la consigna de pedal a cero, parando el motor, todo ello sin dejar de grabar las variables.
6. Una vez el motor parado, la tensión de las baterías experimentan una recuperación como la descrita por la curva de la figura 4.5. Cuando dicha curva alcanza el régimen permanente podemos dar por finalizado el proceso de descarga, parando la grabación para evitar volúmenes excesivos de datos.
7. Finalizado el proceso de descarga, pasamos al de carga. Ante todo iniciamos de nuevo la grabación de las variables (las mismas que para la descarga).
8. Se conecta el cargador y espera que este realice la carga de las baterías. La carga completa se considera alcanzada cuando la intensidad inyectada en las baterías por el cargador toma el valor cero. Llegado a este punto se para la grabación de la carga, dando por finalizado el ensayo.

Entre un ensayo y otro es necesario dejar reposar las baterías, para que establezca el equilibrio térmico y químico en el interior de las mismas, partiendo así en cada ensayo de un estado de carga estable [9].

5.1.4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Una vez establecido el procedimiento para la realización de los ensayos, se ponen en práctica, obteniendo los siguientes resultados:

5.1.4.1. Ensayo realizado con 4V de consigna de pedal (ensayo 1)

Para la consigna de pedal 4V se realiza una descarga de 13A de media durante 10 horas. Según este régimen de descarga, la carga extraída durante el ensayo es de 135.6Ah. Las curvas de reacción de las variables monitorizadas se presentan en la Figura 5.4.

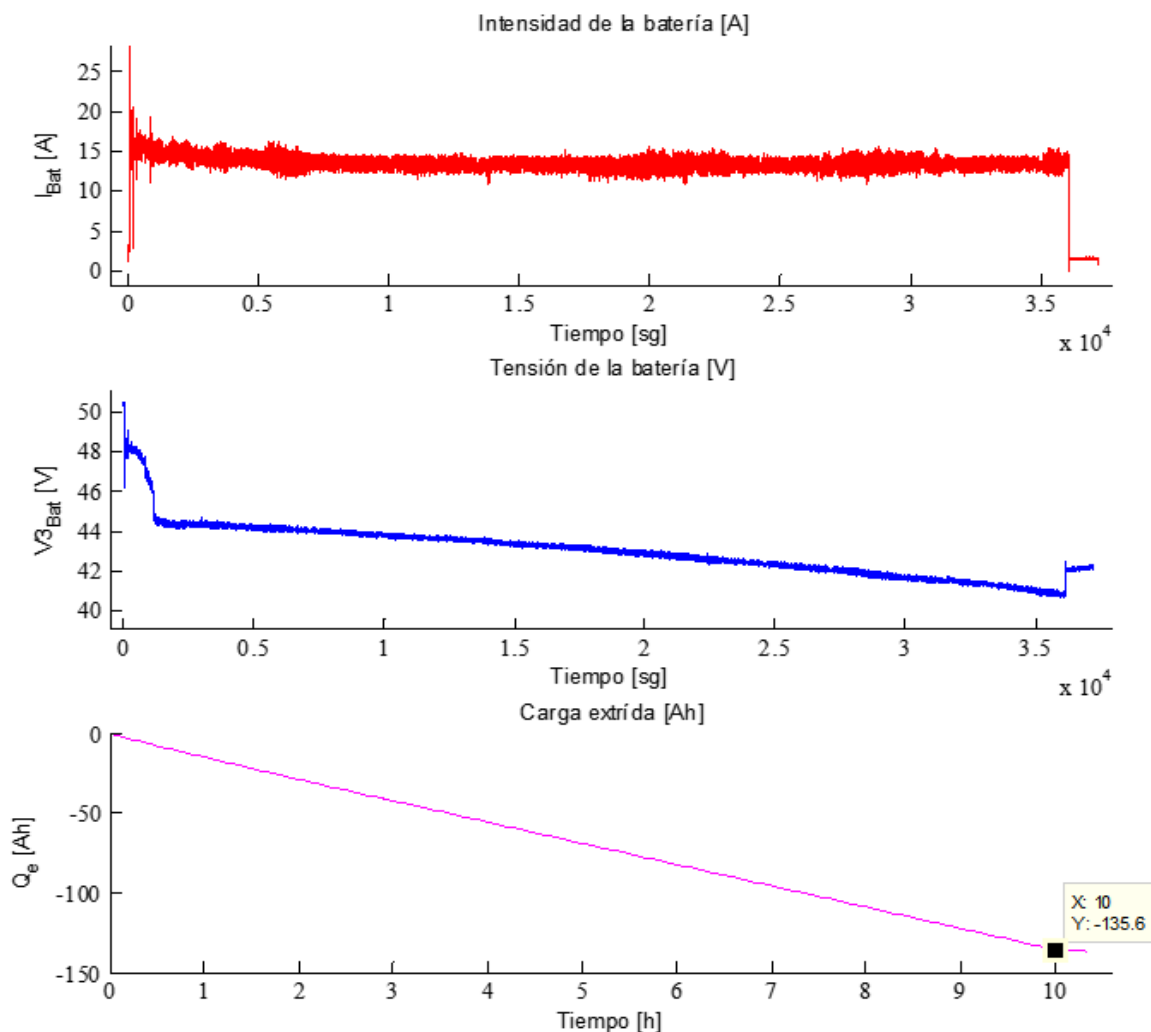


Figura 5.4-Curvas del proceso de descarga de las baterías (ensayo 1)

Como se puede observar en la figura 5.4, en el arranque se tiene un gran pico de intensidad como consecuencia directa del propio funcionamiento del motor DC, que alcanza los 60A, tras lo cual la intensidad de descarga se mantiene entorno a los 13A. En función de la intensidad de descarga se obtiene la carga extraída durante el ensayo, mediante la integral de la misma. La pendiente constante que presenta la carga extraída permite corroborar que el régimen de descarga se ha mantenido constante durante el ensayo.

Por otro lado, se tiene la respuesta en tensión donde en una primera instancia llama la atención la caída de voltaje que experimenta el conjunto de baterías, pero según lo comentado anteriormente dicha caída se corresponde a la descarga prematura de las dos baterías en mal estado.

En la figura 5.5 se puede ver con mejor detalle el comportamiento de la tensión de las baterías. Un enfoque de la gráfica en los primeros instantes del ensayo permite contrastar el comportamiento de la tensión del ensayo con lo descrito por la curva teórica de la figura 4.5, donde el valor de V_0 se corresponde a los 50.4V y V_2 a 48V. Pasando a los últimos instantes del ensayo se puede ver la recuperación de OCV que experimenta las baterías.

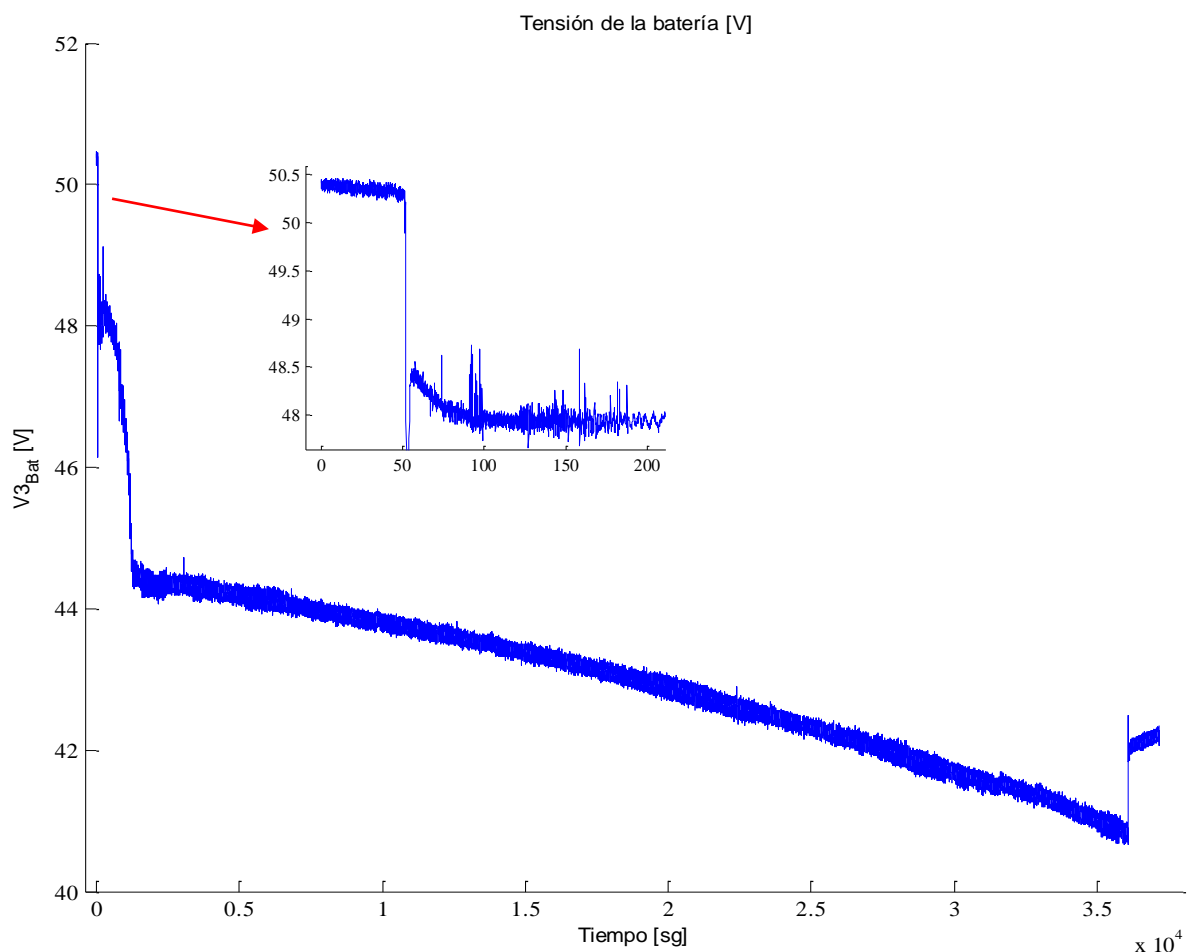


Figura 5.5-Voltaje baterías (ensayo 1)

La temperatura es otra de las variables monitorizadas durante el ensayo, su evolución se puede observar en la figura 5.6. De esta gráfica se ha de remarcar, que durante la descarga realizada, el aumento de temperatura producido respecto a la temperatura ambiente es muy pequeño, del orden de 0.25°C. Dicho aumento no es representativo de las dos baterías en mal estado, experimentando estas un aumento de temperatura entorno a los 40°C al final del ensayo.

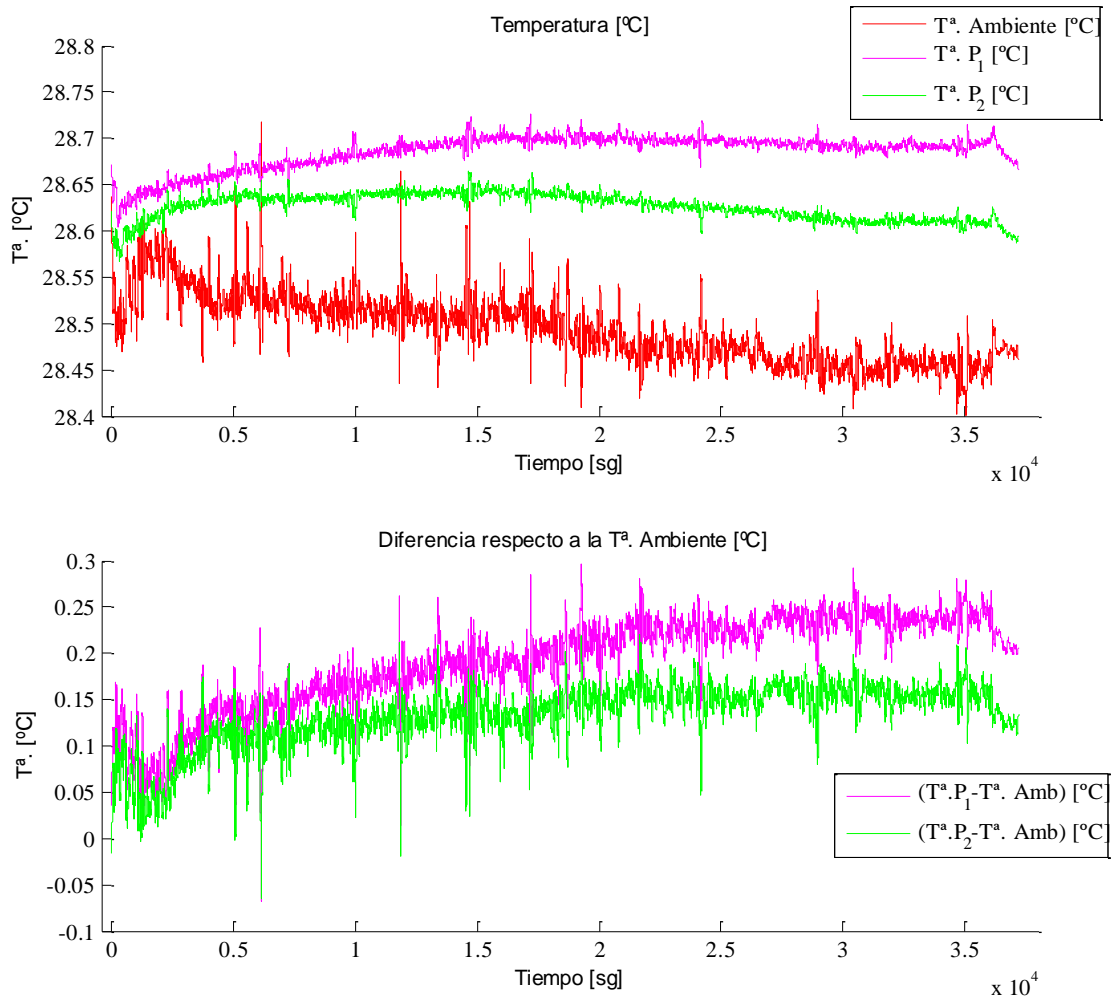


Figura 5.6-Evolución de la temperatura durante la descarga (ensayo 1)

Antes de pasar al análisis de los resultados de la carga comentar, que la pequeña diferencia que se observa entre $T^a.P_1$ y la $T^a.P_2$ es debido a la posición de los sensores, uno de ellos en un borne situado próximo al exterior y el otro más centrado, ver figura 5.7

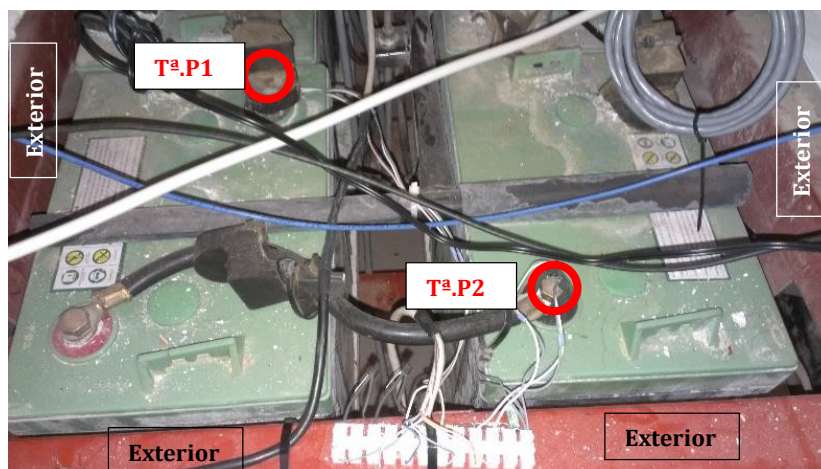


Figura 5.7-Emplazamiento sensores de temperatura

En la figura 5.8 se tiene los resultados del proceso de carga de las baterías. La carga de las baterías se realiza en una primera fase a intensidad constante de 18A hasta que el voltaje de las baterías alcanza los 58.1V. En la segunda fase el voltaje se mantiene constante mientras la intensidad va disminuyendo a medida que aumenta la carga de las baterías. Cuando la corriente llega entorno a los 3A se inicia la última fase de la carga a intensidad constante. Tras la cual finaliza la carga. Este tipo de carga se corresponde a un perfil IU1a [36][37]:

- $I_1 =$ intensidad constante 1 fase;
- $U =$ tensión constante;
- $I_2 =$ intensidad constante 2 fase;
- $a =$ carga completa.

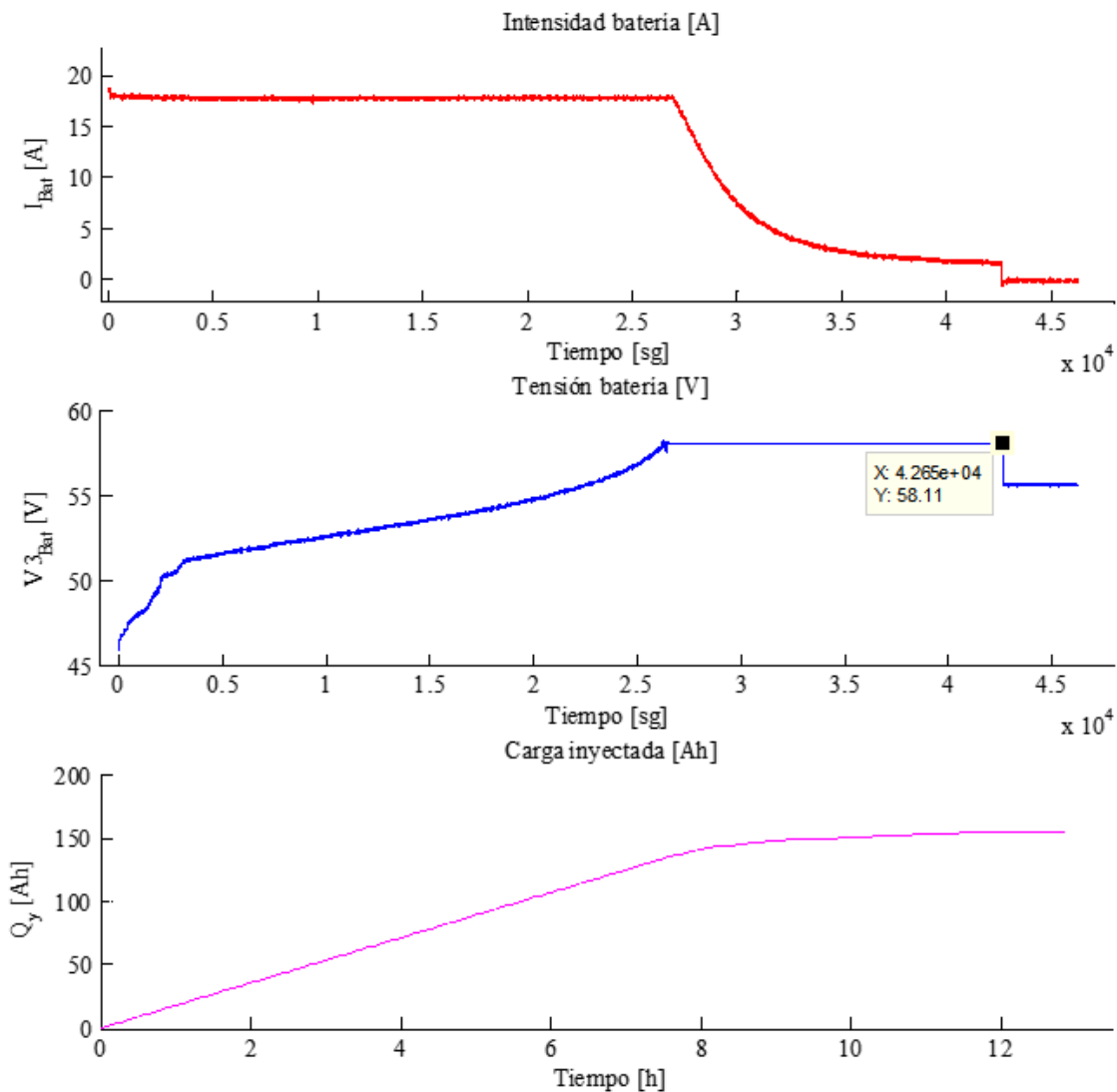


Figura 5.8-Curvas del proceso de carga de las baterías (ensayo 1)

En la figura 5.9 se puede observar la evolución de la temperatura durante el proceso de carga de las baterías. A diferencia del proceso de descarga, aquí si se tiene un aumento más pronunciado de la temperatura.

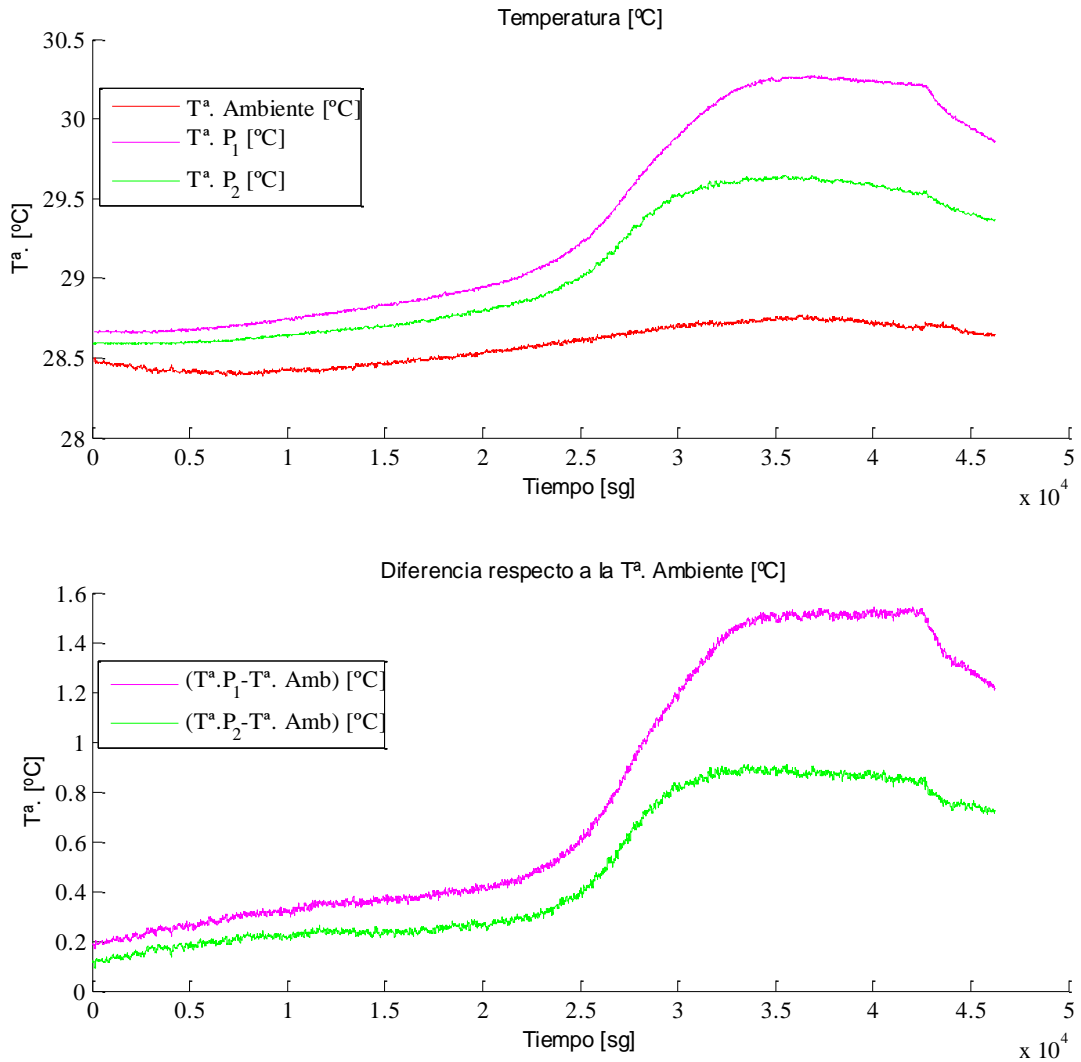


Figura 5.9- Evolución de la temperatura durante la carga (ensayo 1)

5.1.4.2. *Ensayo realizado con 4.3V de consigna de pedal (ensayo 2)*

Para la consigna de pedal 4.3V se realiza una descarga de 14A de media durante 10.68 horas. Según este régimen de descarga, la carga extraída durante el ensayo es de 144Ah. Las curvas de reacción de las variables monitorizadas se presentan en la Figura 5.10.

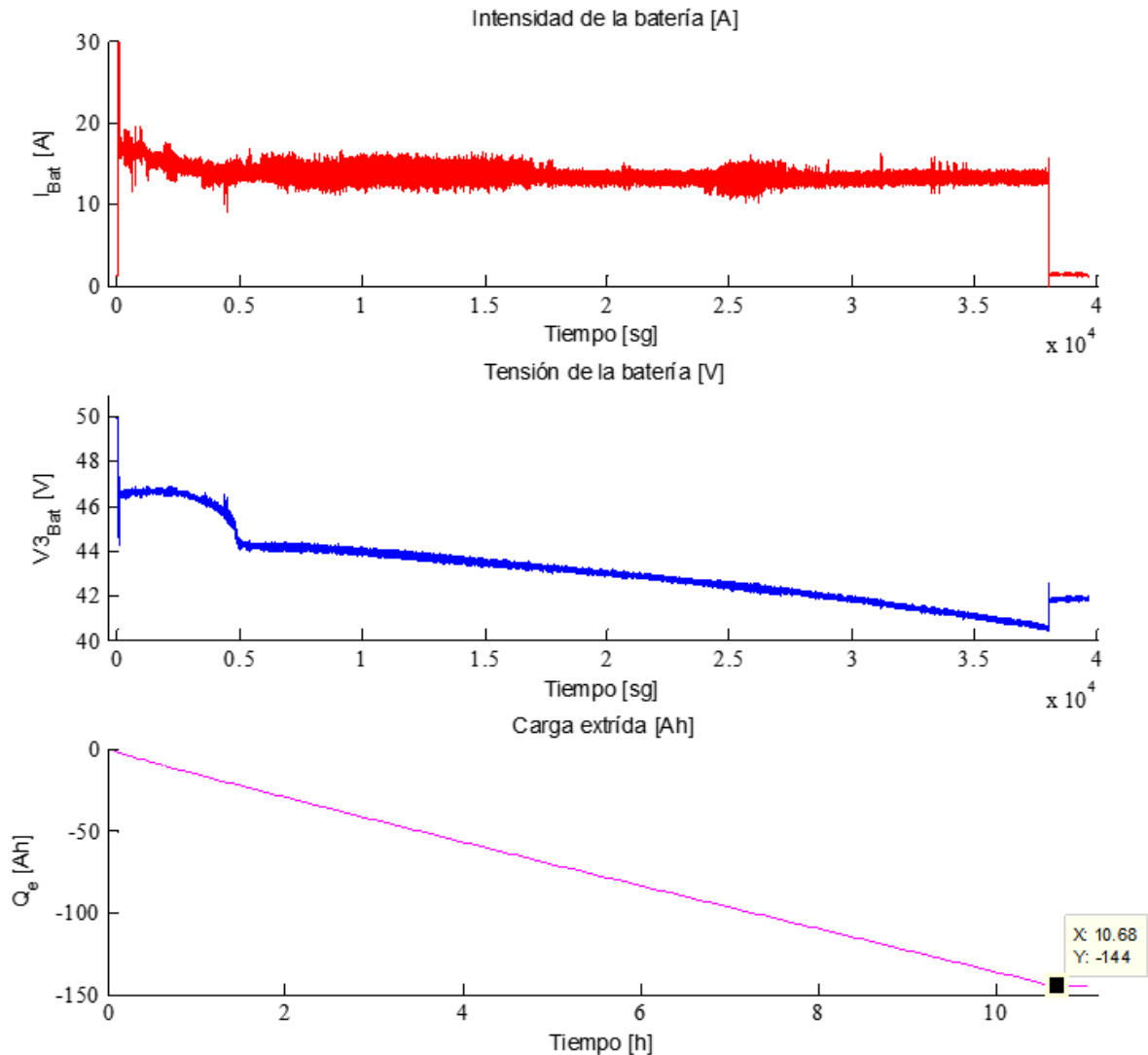


Figura 5.10- Curvas del proceso de descarga de las baterías (ensayo 2)

Al igual que en el anterior ensayo se vuelve a tener un pico de intensidad en el arranque (figura 5.10) al que se suma un pequeño descenso de la intensidad de descarga. En este ensayo la intensidad presenta más ruido, como consecuencia del aumento de las vibraciones por el funcionamiento del motor.

En la respuesta de la tensión se vuelve a tener presente la descarga de las dos baterías en mal estado, aunque durante este ensayo se han descargado más lentamente. El valor de V_0 es el mismo que el del ensayo anterior, pero en cambio el de V_2 ha disminuido a 46.5V.

La temperatura (figura 5.11) durante este ensayo no varía mucho, se tienen diferencias del mismo orden que en el ensayo de 4V consigna de pedal. En cambio la temperatura de las baterías en mal estado ha experimentado un aumento aun mayor, llegando a los 42°C al final del ensayo.

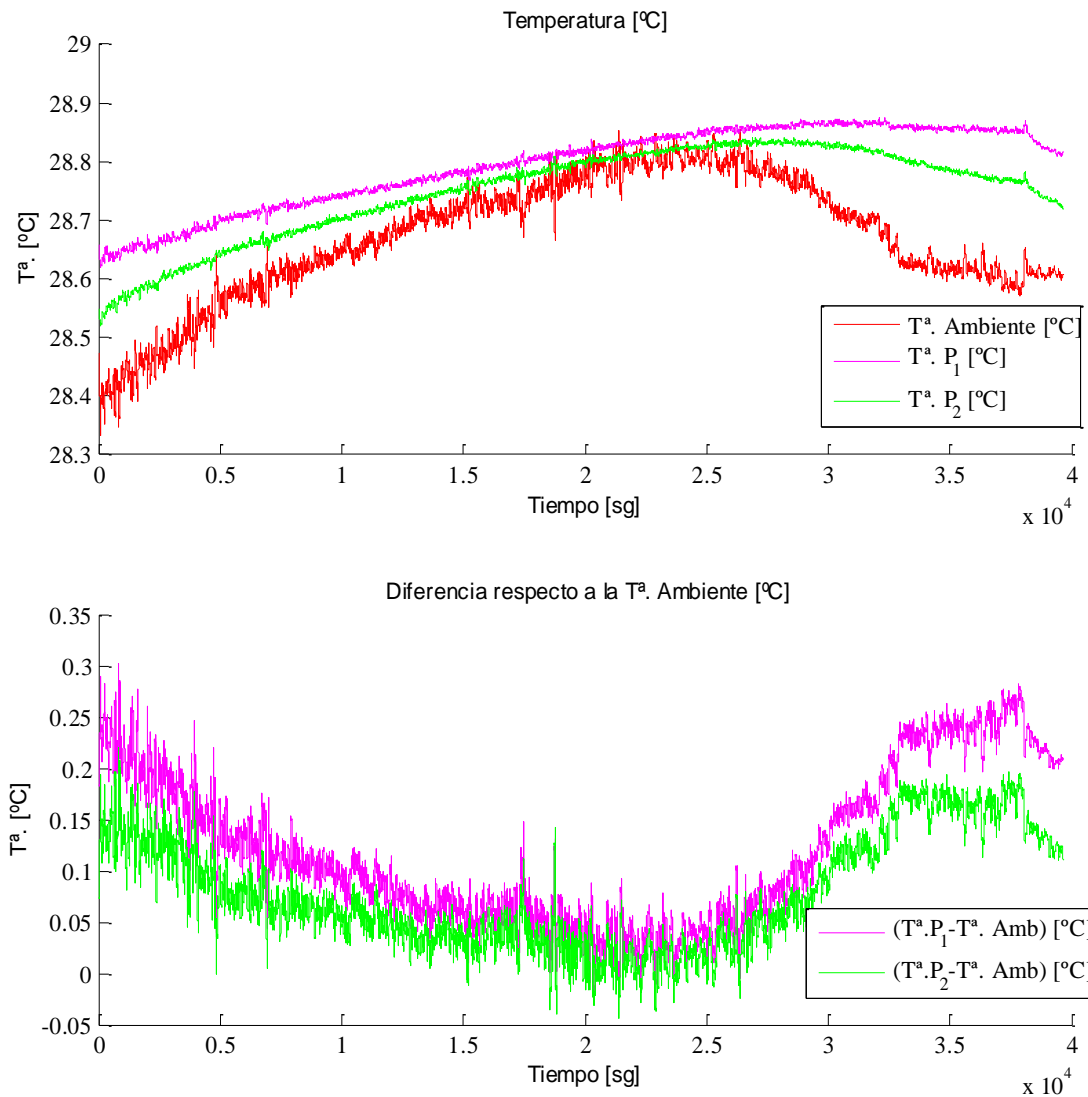


Figura 5.11- Evolución de la temperatura durante la descarga (ensayo 2)

La carga de este ensayo (figura 5.12) sigue el mismo perfil que en el ensayo anterior, con la salvedad de que la cantidad de carga inyectada es mayor. Al inyectar mayor cantidad de energía en las baterías, la temperatura (Figura 5.13) experimenta un aumento aún mayor que en el caso anterior.

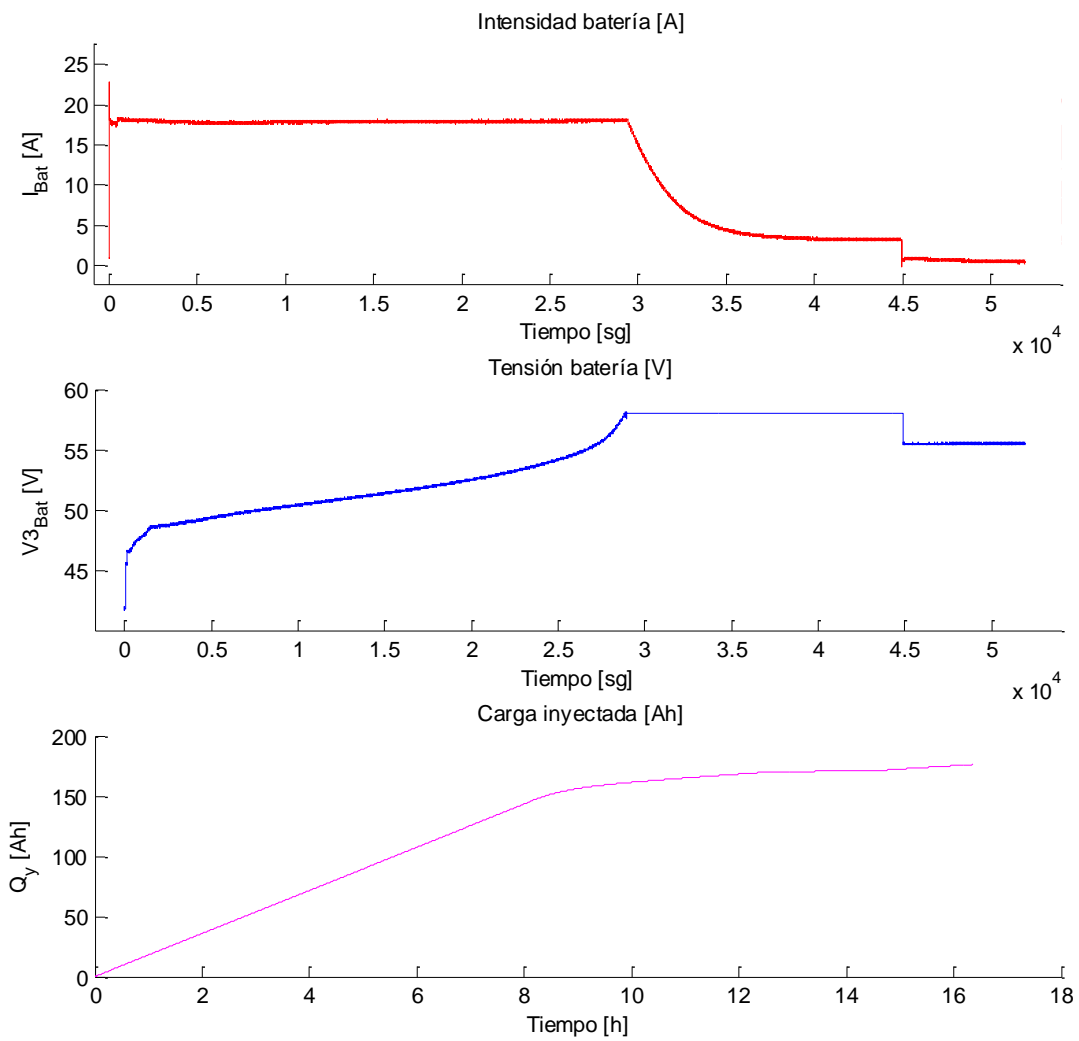


Figura 5.12- Curvas del proceso de carga de las baterías (ensayo 2)

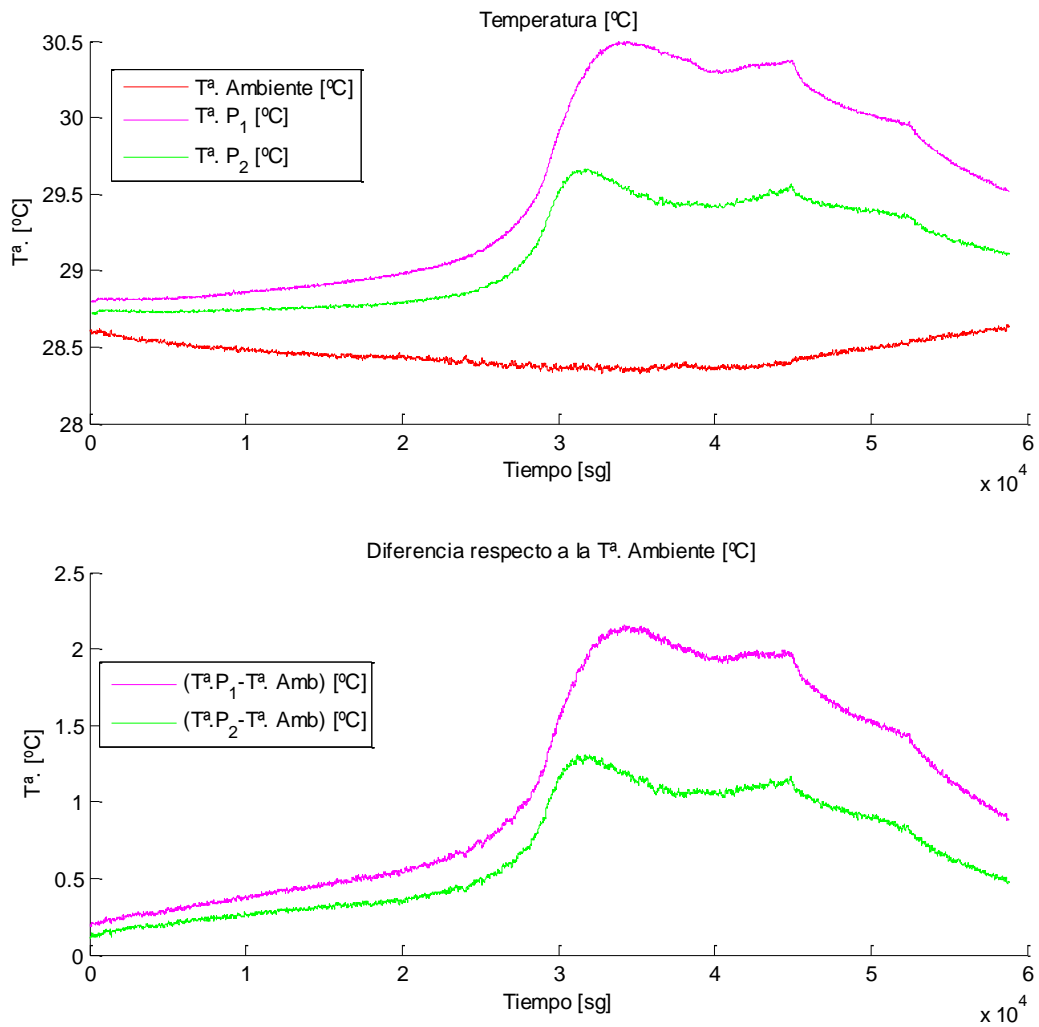


Figura 5.13- Evolución de la temperatura durante la carga (ensayo 2)

5.1.4.3. *Ensayo realizado con 4.4V de consigna de pedal (ensayo 3)*

Para la consigna de pedal 4.4V se realiza una descarga de 17A de media durante 10 horas. Según este régimen de descarga, la carga extraída durante el ensayo es de 141.7Ah. Las curvas de reacción de las variables monitorizadas se presentan en la Figura 5.14.

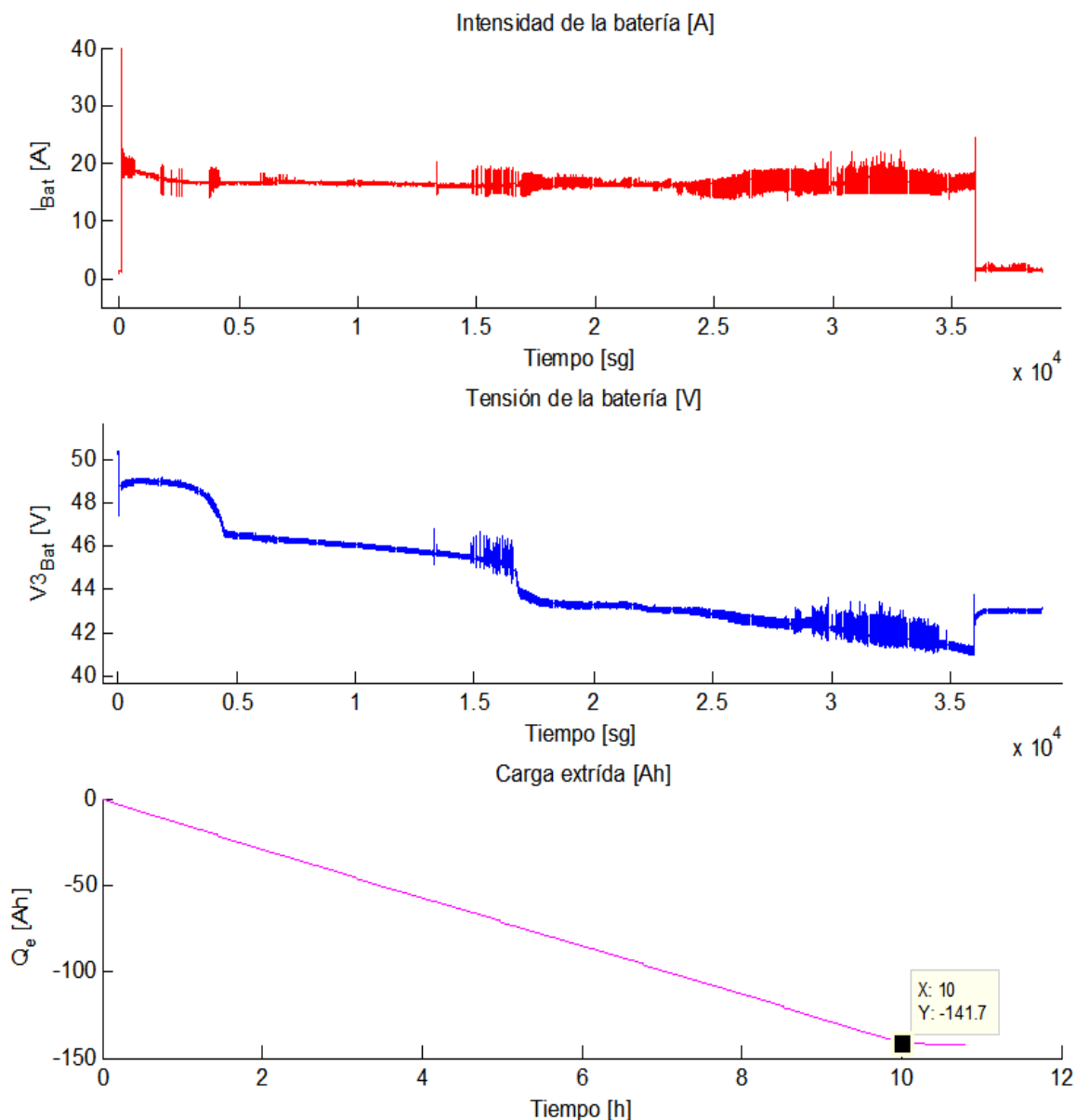


Figura 5.14- Curvas del proceso de descarga de las baterías (ensayo 3)

Mientras en la curva de intensidad no se remarca nada nuevo, la respuesta de la tensión presenta otro escalón de descarga (figura 5.14). Con lo cual a las dos baterías en mal estado se le suman otras, en este caso no identificadas. Todo esto conlleva la necesidad de sustituir cuanto antes las ocho baterías que alimentan el vehículo, dado su mal estado.

La temperatura (figura 5.11) en este ensayo no varía mucho, se tiene diferencias del mismo orden que en el ensayo de 4V y 4.3V de consigna de pedal. Las dos baterías no han presentado un incremento mayor respecto al anterior ensayo. En este caso la anomalía presente en la curva de tensión no se ha conseguido relacionar con el aumento de temperatura de otra/otras baterías en particular.

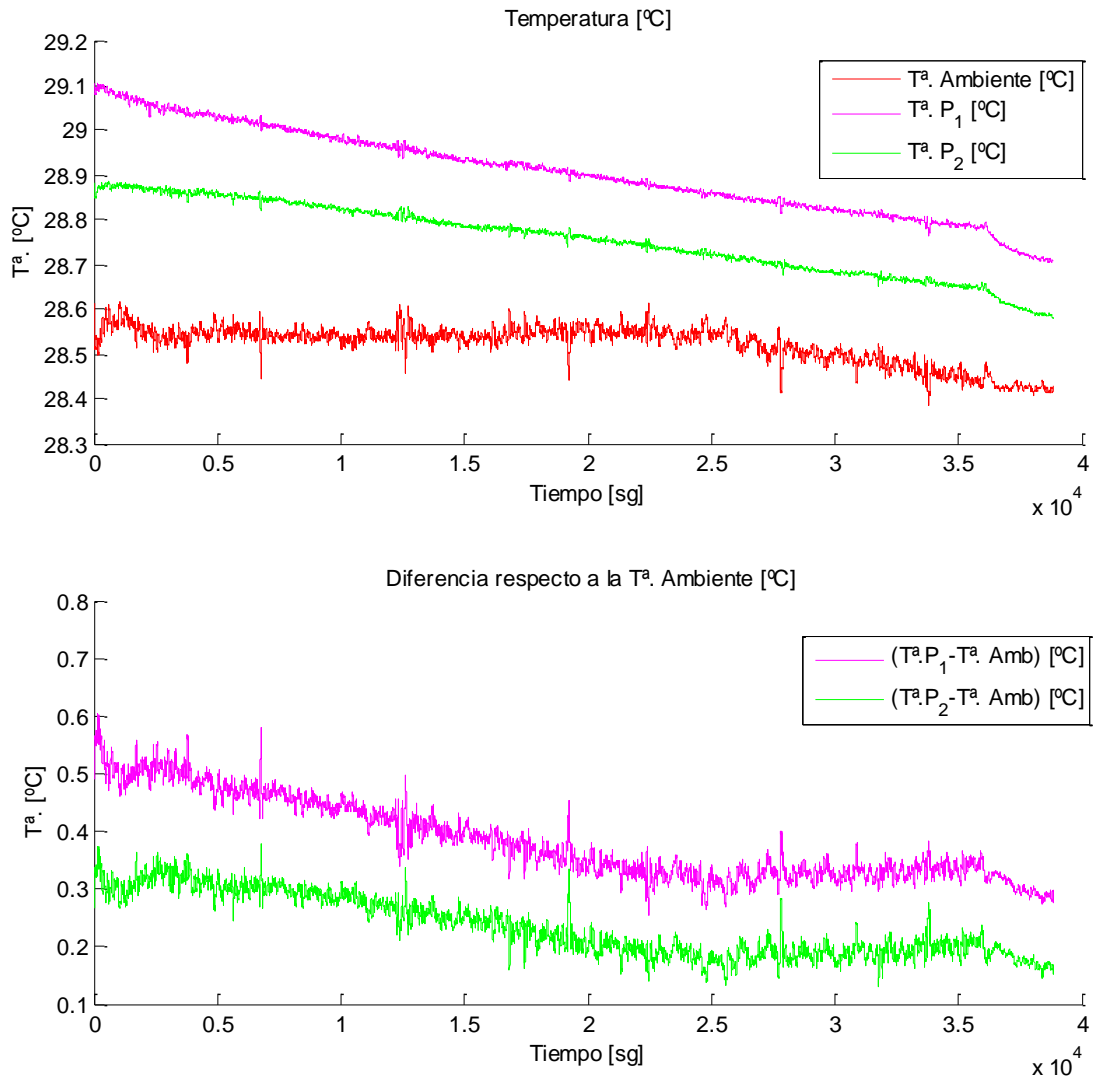


Figura 5.15- Evolución de la temperatura durante la descarga (ensayo 3)

La carga de este ensayo (figura 5.16) sigue el mismo perfil que en los demás, siendo esto un buen indicio del correcto funcionamiento del cargador. Al igual que la carga, la temperatura (figura 5.17) sigue en la misma línea de los ensayos anteriores.

Cabe remarcar que el mal estado de las baterías no manifiesta cambios en el proceso de carga, al ser el cargador quién marca las pautas del proceso.

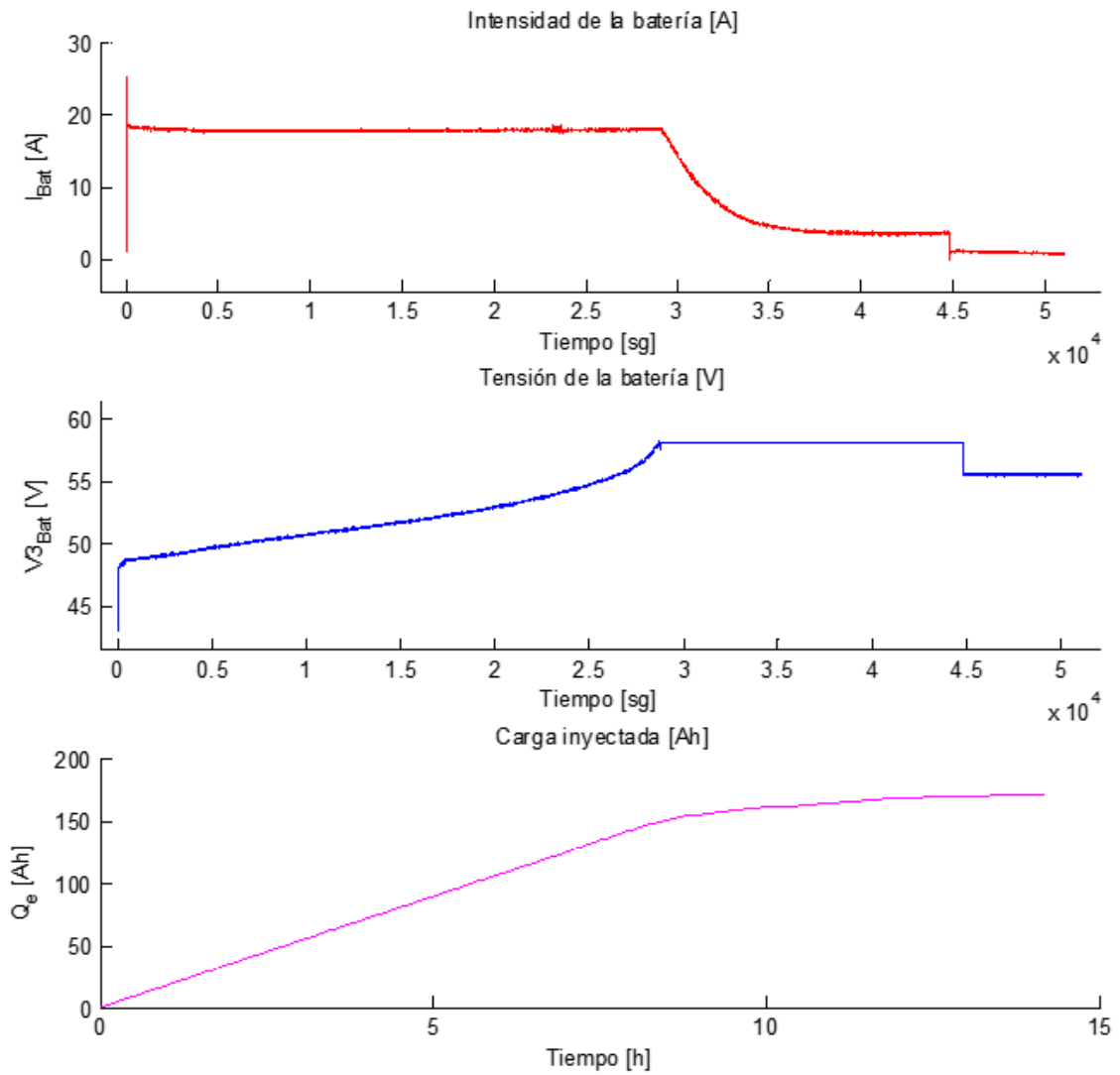


Figura 5.16- Curvas del proceso de carga de las baterías (ensayo 3)

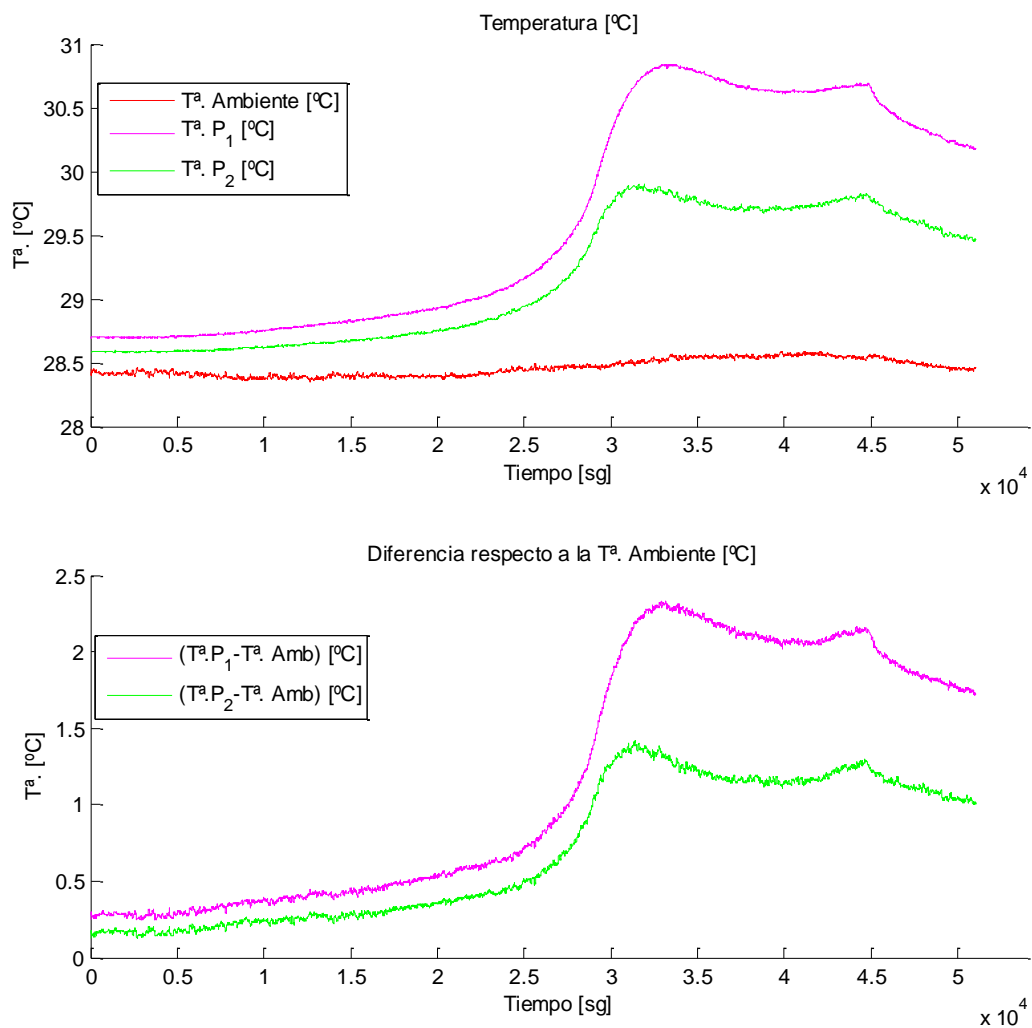


Figura 5.17- Evolución de la temperatura durante la carga (ensayo 3)

5.1.4.1. *Ensayo realizado con 4.5V de consigna de pedal (ensayo 4)*

Para la consigna de pedal 4.5V se realiza una descarga de 20A de media durante 8.6 horas. Según este régimen de descarga, la carga extraída durante el ensayo es de 118.4Ah. Las curvas de reacción de las variables monitorizadas se presentan en la Figura 5.18.

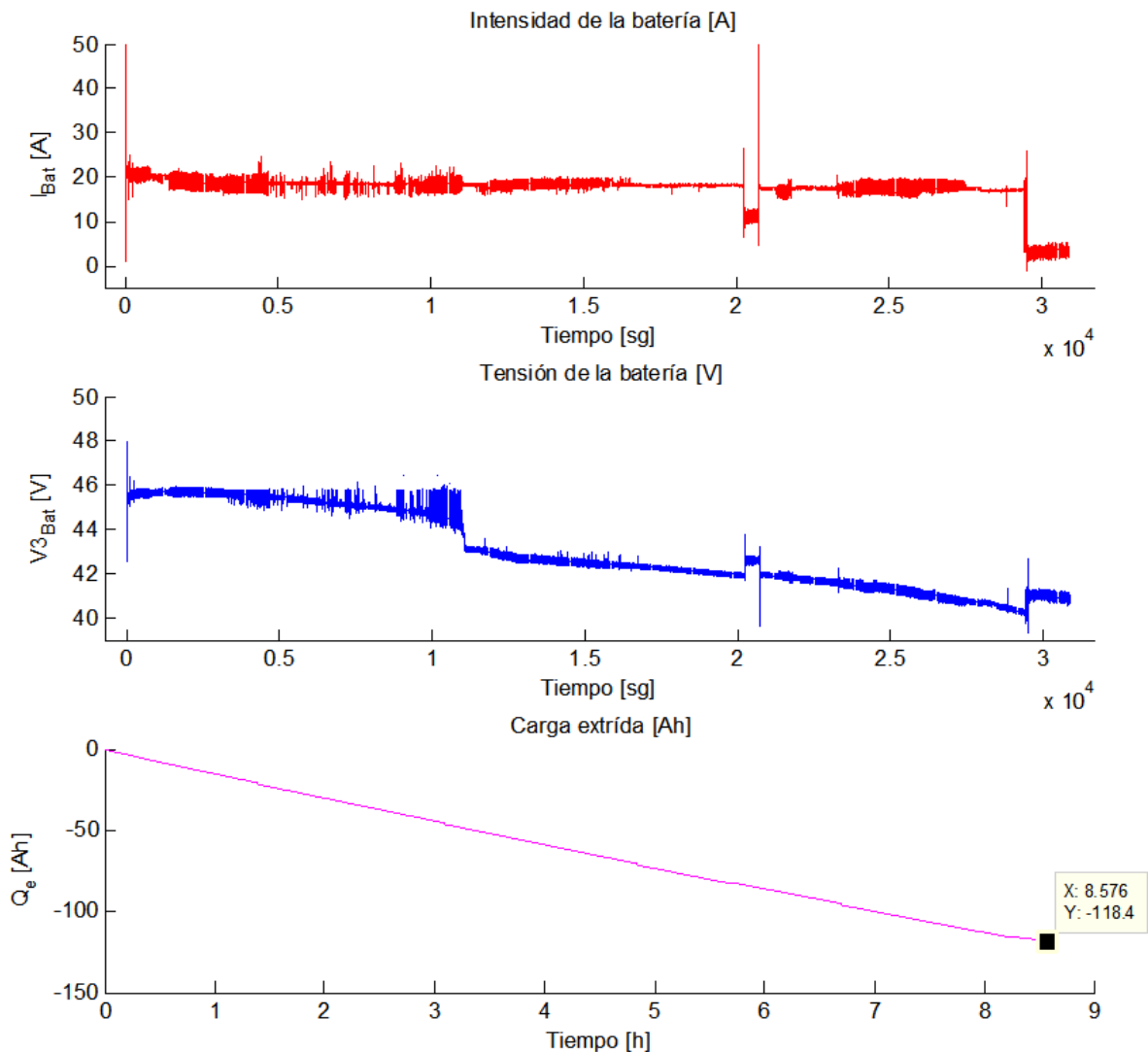


Figura 5.18- Curvas del proceso de descarga de las baterías (ensayo 4)

En este ensayo, aún más exigente que todos los anteriores, se observa que el motor no es capaz de mantener la carga constante durante todo el ensayo (figura 5.18), pero al ser breve el periodo en el que la carga disminuye no presenta mayor importancia.

La respuesta en tensión llama mucho más la atención, la figura 5.19 proporciona mayor detalle. La descarga típica de las dos baterías presente en los demás ensayos ya no está presente, con lo cual frente a este régimen de descarga y a estas alturas de los

ensayos las dos baterías parecen no suministrar energía alguna, como consecuencia de ello la tensión V_0 baja a 48V y con ello la V_2 a 45.5V.

Los resultados de este ensayo, confirma definitivamente la necesidad urgente de cambiar el sistema de alimentación del vehículo formado por las ocho baterías GreenSaver SP210-6.

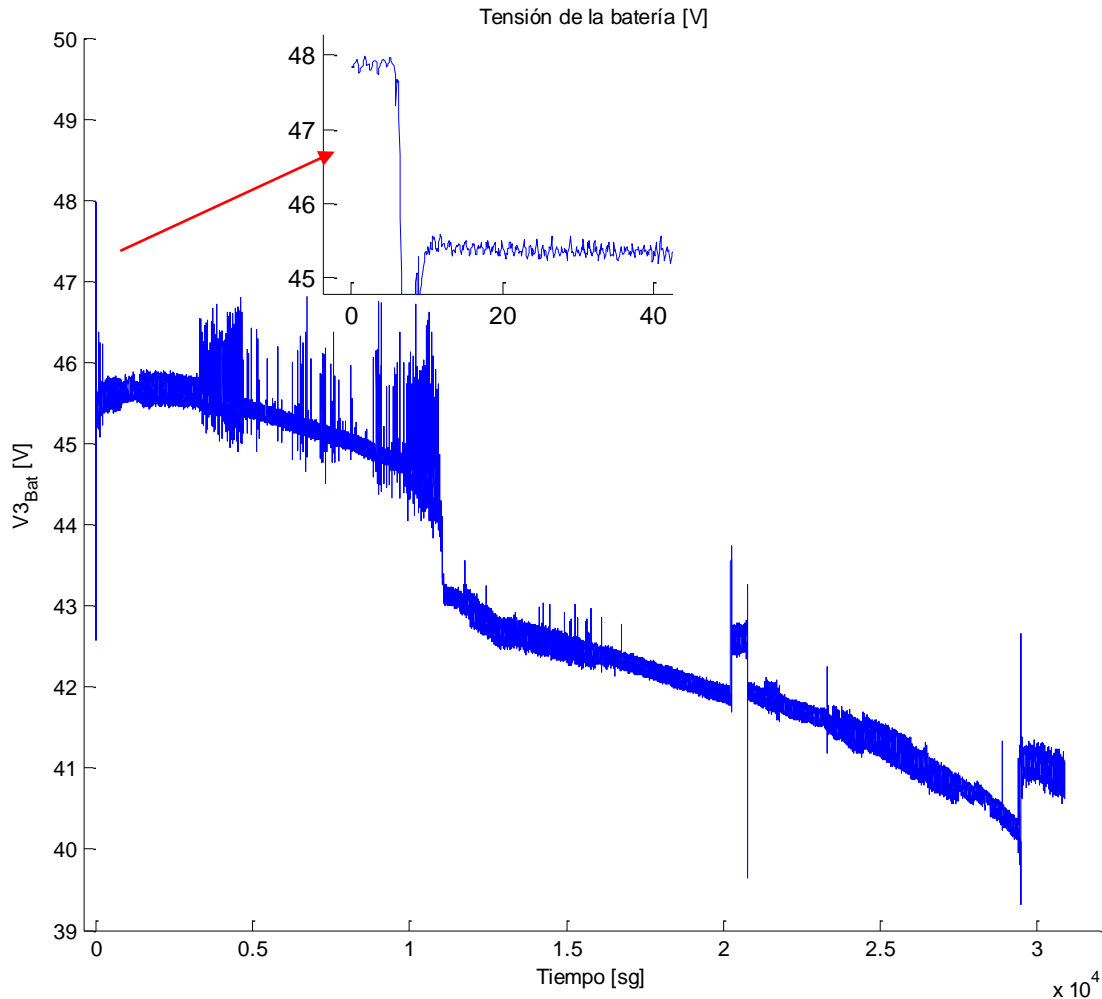


Figura 5.19-Voltaje baterías (ensayo 4).

La temperatura (figura 5.20) de este ensayo no presenta anomalías, simplemente un ligero aumento de la temperatura con respecto a los anteriores. Siendo esto de esperar al tener un régimen de descarga más agresivo. Dichas anomalías si se han presentado en las dos baterías, cuya temperatura al final del ensayo había alcanzado los 45°C.

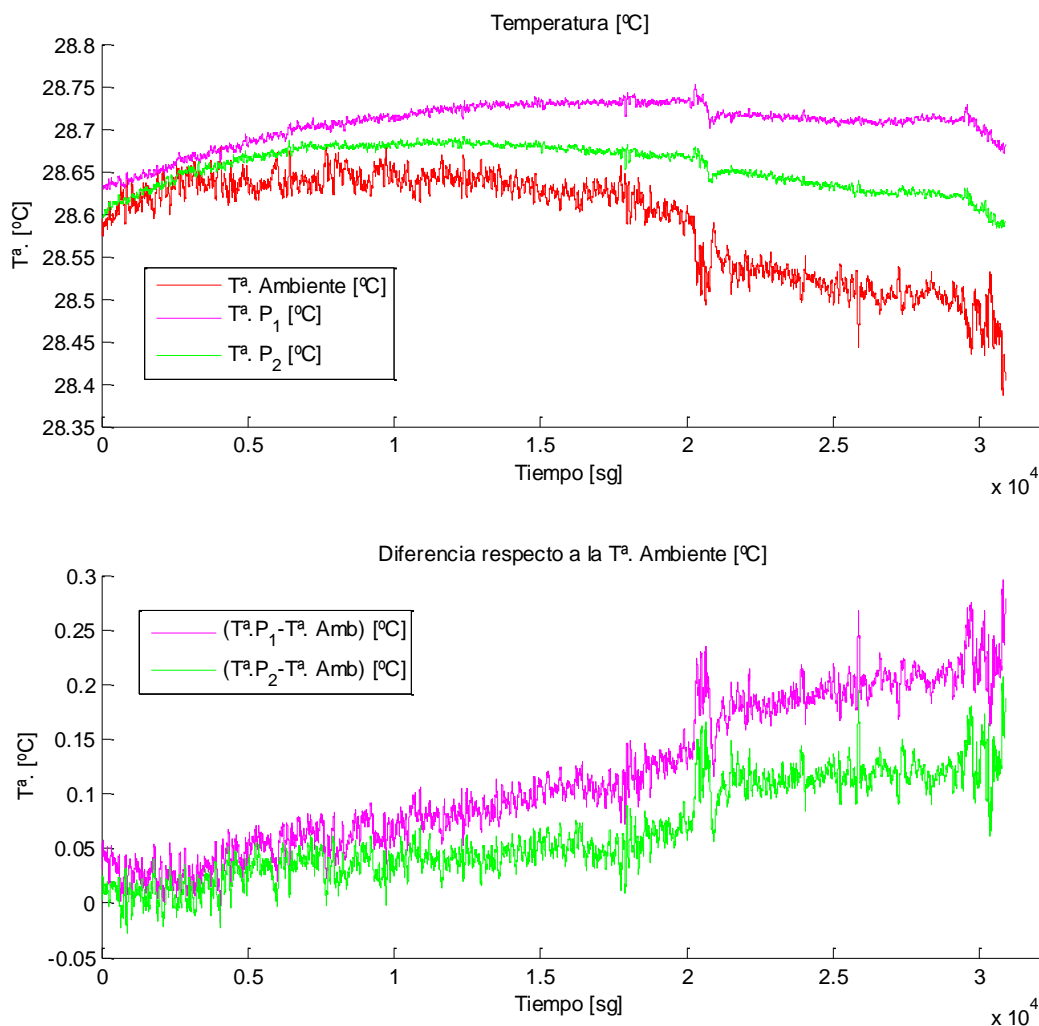


Figura 5.20- Evolución de la temperatura durante la descarga (ensayo 4)

La pérdida de las dos baterías se refleja en el proceso de carga (figura 5.22) tanto durante la primera fase de la carga a intensidad constante, como una vez finalizada la carga, donde tras escasos 3 minutos el cargador entiende que las baterías están descargada iniciando de nuevo el proceso de carga.

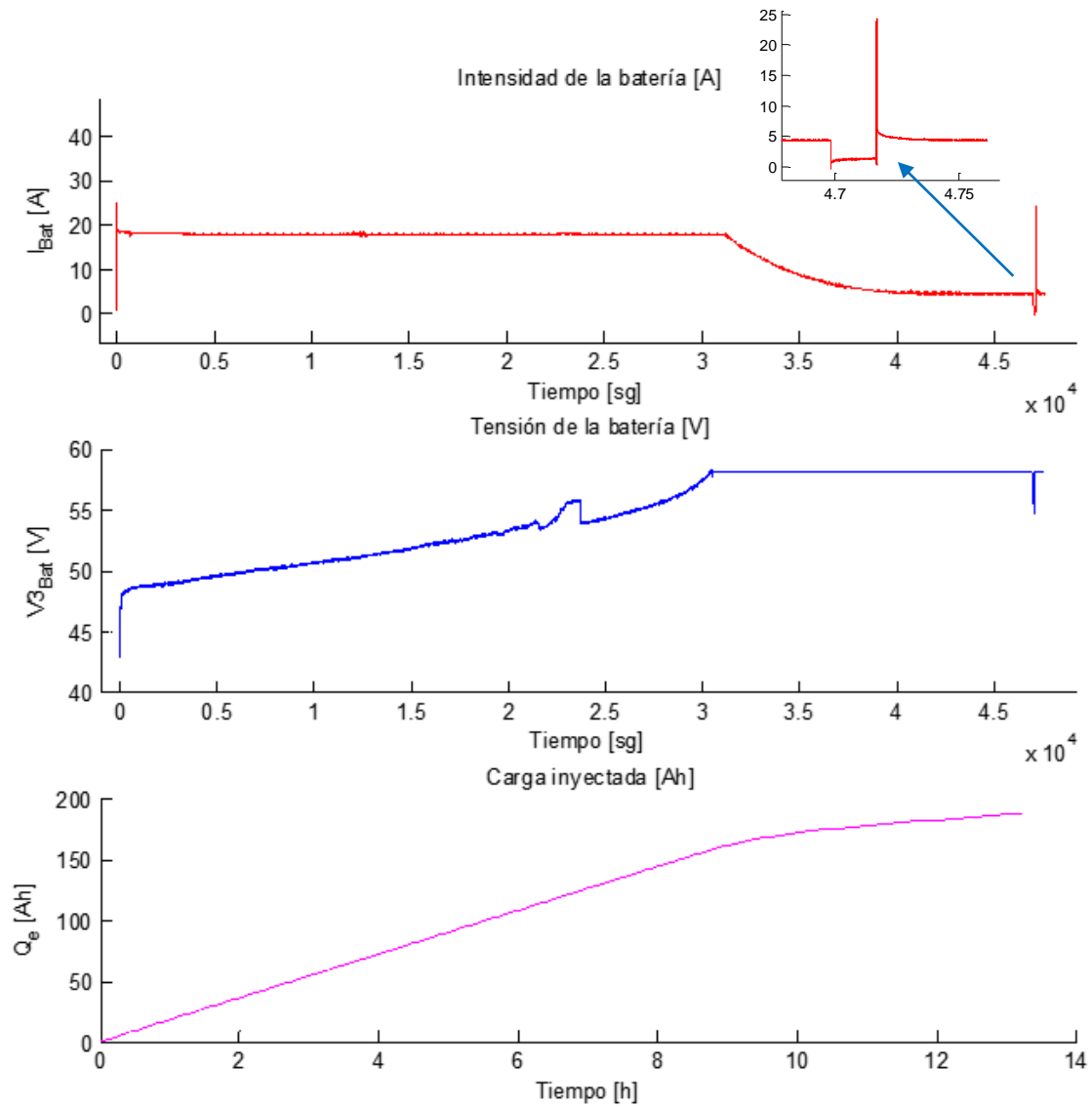


Figura 5.21- Curvas del proceso de carga de las baterías (ensayo 4)

La temperatura del proceso de carga (figura 5.22) no refleja ninguno de los cambios comentados anteriormente.

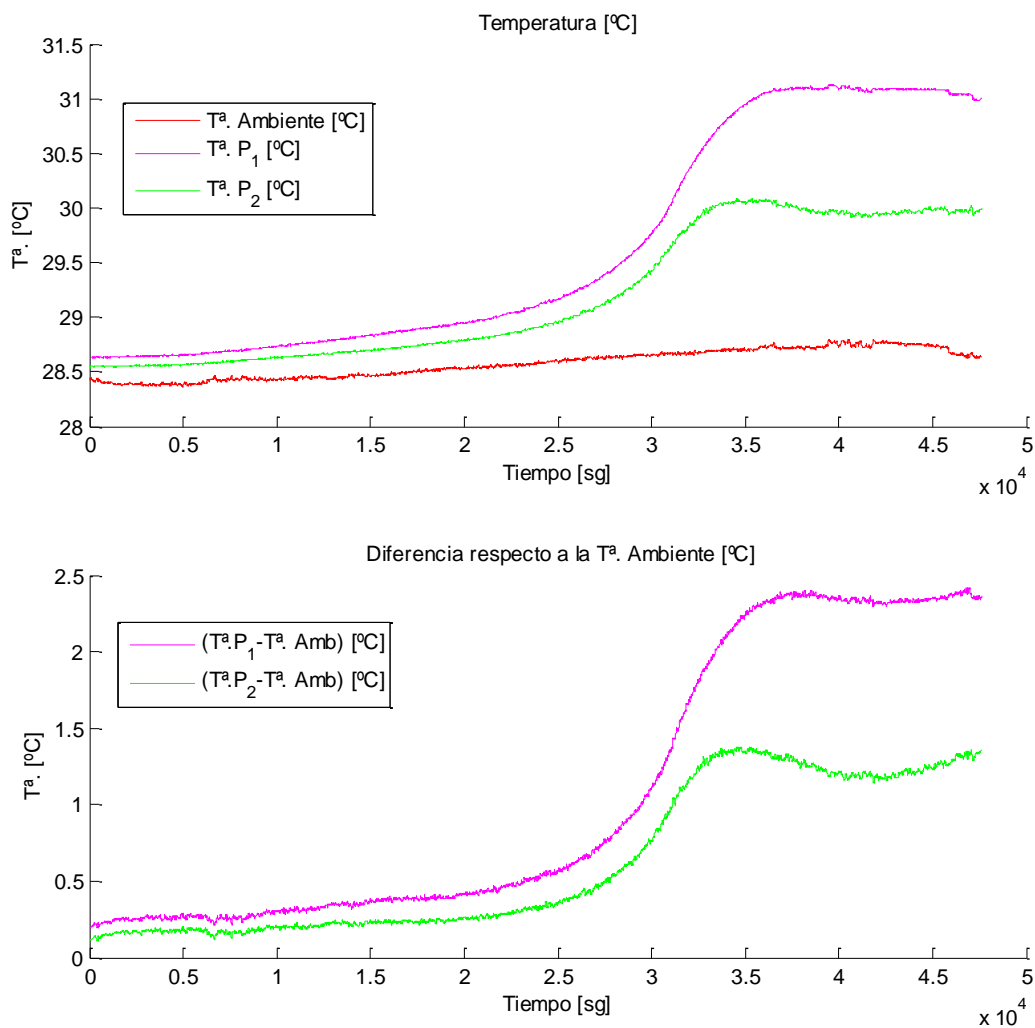


Figura 5.22- Evolución de la temperatura durante la carga (ensayo 4)

5.1.5. CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS

La utilización del motor como carga para descargar las baterías ha resultado ser adecuada en lo referente al objetivo de descarga las baterías a intensidad constante. Sin embargo, con el motor funcionando sin tener carga adicional, es decir solo con la carga ofrecida por la caja de engranaje y los rodamientos de las ruedas, ofrece un rango de intensidad de descarga muy pequeño con respecto al rango de intensidad que son capaces de soportar las baterías según las el datasheet ([27]).

Dado el estado actual de las baterías se considera suficiente el rango de intensidad de descarga proporcionado por el motor sin carga adicional. Aumentar la intensidad de descarga proporcionaría información valida sobre la carga extraída, pero en ningún caso referente al perfil de tensión, ya que a medida que aumenta la intensidad se produce el fallo de múltiples baterías.

En futuros ensayos, con unas baterías en buen estado, para obtener información referente al comportamiento de las baterías en todo el rango de funcionamiento se recomienda la utilización de una carga programable (dispositivo capaz de realizar la

descarga de la batería de forma controlada) o un banco de pruebas que permita aplicar más carga al motor. Este último, además de ser útil para el modelo de las baterías, es necesario de cara al modelado del motor DC del vehículo eCARM.

En la tabla 5.3 se resume los datos de los ensayos de descarga.

Tabla 5.3-Resumen datos descarga de las baterías.

DESCARGA	Tiempo (h)	Intensidad media (A)	Carga extraída (Ah)
4V	10	13	135.6
4.3	10.68	14	144
4.4V	10	17	141.7
4.5V	8.6	20	118.4

En la tabla 5.4 se resume los datos de los ensayos de carga.

Tabla 5.4-Resumen datos carga de las baterías.

CARGA	Tiempo (h)	Carga inyectada (Ah)	Eficiencia Q_e/Q_i
4V	12	152.9	88.7%
4.3	14	171	84.2%
4.4V	13	170.2	83.2%
4.5V	13.2	187.6	63.1%

Como era de esperar la eficiencia de la carga baja de manera considerable a medida que el régimen de descarga es mayor.

Por otro lado, la necesidad de un set nuevo de baterías es evidente en todos los ensayos, aunque inicialmente se pensaba que con la sustitución de dos de ella sería suficiente, los resultados de los últimos ensayos presentados, muestran la existencia de más baterías predispuestas a fallar.

Basándose en los resultados de temperatura de los ensayo se puede afirmar que la temperatura es una de las variables que permite detectar defectos en las baterías, pero es un indicador tardío, es decir, las anomalías de temperatura se presentan en una fase terminal de la vida útil de las baterías.

5.2. ENSAYOS SOBRE EL CONTROLADOR.

5.2.1. INTRODUCCIÓN

La información que proporciona el fabricante del controlador, hace referencia a las prestaciones, conexiones, configuración,... todo ello, sin ofrecer detalle en relación al funcionamiento interno. Presenta el producto como una caja negra, capaz de ofrecer una serie de prestaciones controladas por la configuración de unos parámetros. Además, dichos parámetros en muchos de los casos, el nuestro concretamente, vienen ya implementados directamente por el fabricante.

Para los usuarios que simplemente necesitan una solución, un medio, un dispositivo para llevar a cabo su trabajo, lo proporcionado por el manual del fabricante es más que suficiente. En cambio, los usuarios que buscan ofrecer una solución, una mejora técnica,... echan en falta detalles más específicos del producto.

En este TFG se inicia parte de la búsqueda del mayor detalle en lo relacionado al comportamiento y funcionamiento de la salida en tensión del controlador frente a la entrada del pedal/acelerador.

Para ello se ha realizado una serie de ensayo en los que se ha monitorizado la tensión de entrada del acelerador y la salida en tensión del controlador.

5.2.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.

Con objetivo de capturar lo mejor posible la dinámica del controlador frente a la entrada en tensión del acelerador (0-5V), se realizan escalones con forma de escalera de la misma amplitud (0.5V) a fin de observar la no linealidad del proceso., tanto en subida como en bajada, y para cada una de las dos configuraciones del controlador (modo 1 o velocidad baja, modo 2 o velocidad alta). Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

La figura 5.23 muestra los resultados obtenidos para el modo 1 de funcionamiento. Se presenta un sistema no-lineal, cuyo comportamiento frente a la entrada en escalón viene descrito por una dinámica de primer orden sin retardo. Analizando la respuesta con más detalle, se observa una zona muerta de 0.5V para la entrada del pedal, y una saturación de la entrada a partir de 4.5V.

Analizando la ganancia de cada uno de los escalones, vemos que su valor evoluciona de forma exponencial, en cambio, la constante de tiempo varía muy poco de un escalón a otro.

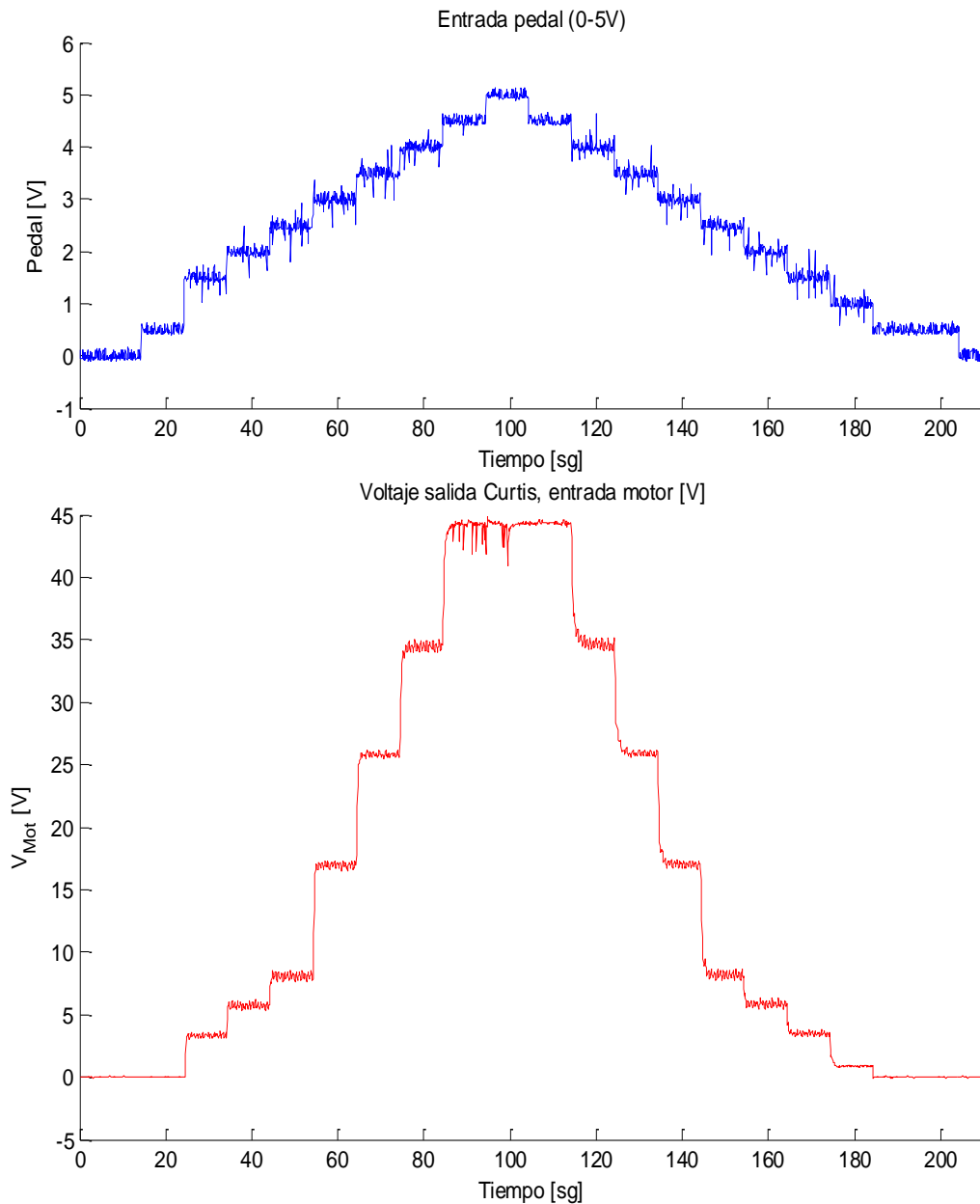


Figura 5.23-Ensayo Curtis modo de funcionamiento 1.

La figura 5.24 muestra los resultados obtenidos para el modo 2 de funcionamiento. Se presenta un comportamiento no lineal, con una dinámica de primer orden sin retardo frente a la entrada escalón y con la misma zona muerta del modo de funcionamiento 1. La diferencia remarcable entre los dos modos de funcionamiento se presenta en el valor de la saturación de la entrada, situada en este caso en 3.5V.

Otra diferencia substancial entre los dos modos es la ganancia, el valor de estado estacionario del modo cambia de un modo a otro. También cambia la constante de tiempo, aunque de forma menos evidente, siendo más rápida la respuesta del sistema en el modo de funcionamiento 2.

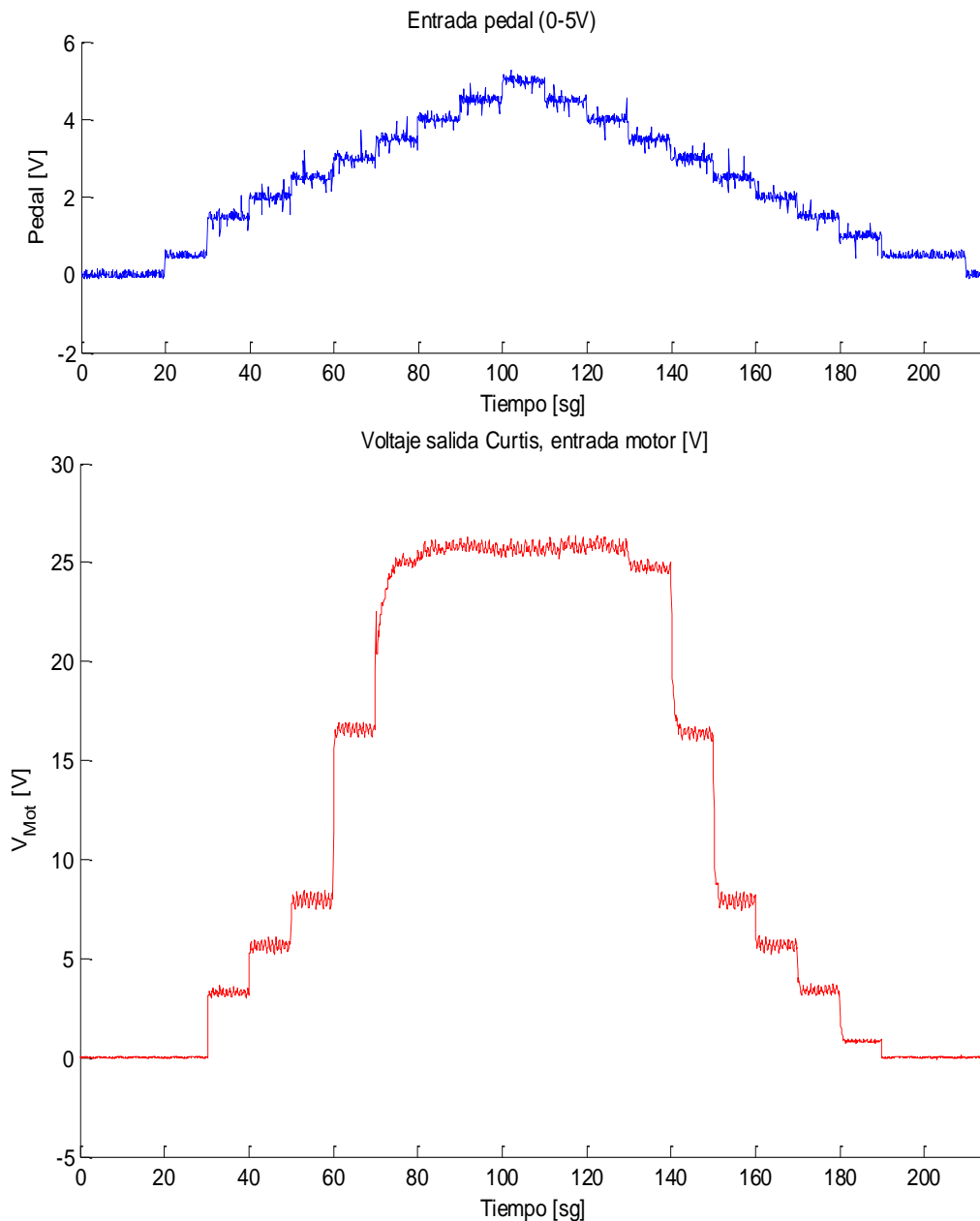


Figura 5.24-Ensayo Curtis modo de funcionamiento 2.

Con objetivo de ver la influencia de la velocidad del motor en la salida de tensión del controlador, se ha realizado un recorrido por el recinto de la Universidad de Almería, desde la parada de autobuses al aparcamiento norte (figura 5.25), con una consigna de 2.5V en la entrada del pedal/acelerador y modo de funcionamiento 1. Los resultados obtenidos en este experimento se muestran en la figura 5.26.

La realización de más ensayos en carga no ha sido posible por avería del vehículo *eCARM*, pero basándose en la respuesta de la constante de tiempo y estado estacionario alcanzado por la salida en tensión del controlador para la consigna 2.5V (figura 5.26), cuyo valores coinciden con los de los ensayos en vacío, podemos afirmar que la velocidad y la carga del vehículo no influye en la salida de tensión.



Figura 5.25- Trayecto recorrido en el ensayo por el recinto de la UAL

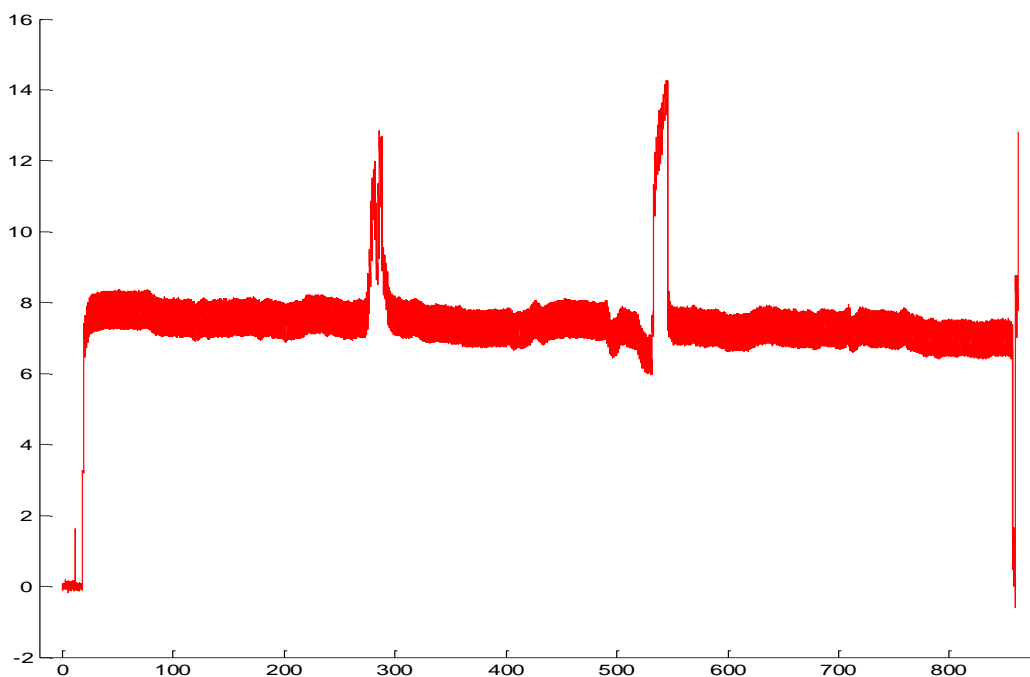


Figura 5.26-Salida de tensión del Curtis, ensayo trayectoria velocidad variable.

Los dos picos presentes en la salida de tensión (Figura 5.26), se deben a la intervención humana, manteniendo el controlador en todo momento la misma tensión de salida independientemente de la velocidad. La intervención humana se ha realizado para evitar perder el control del vehículo.

CAPÍTULO 6. PARÁMETROS DEL MODELO.

SIMULACIÓN

6.1. PARÁMETROS Y SIMULACIÓN DEL MODELO DE LA BATERÍAS.

La obtención de los parámetros del modelo de las baterías se ha dividido en dos partes. En una primera etapa se obtiene los parámetros referentes a la capacidad $C(I, \theta)$ (ecuación (4.13)). Partiendo de los datos de descarga de los ensayos y basándose en la fórmula de la capacidad, se define una función de coste representativa del error absoluto entre los datos de capacidad de los ensayos y los obtenidos mediante la fórmula empírica de la capacidad, con el objetivo de identificar el valor de los parámetros que hacen mínima la función de coste.

El proceso de identificación mencionado anteriormente se lleva a cabo mediante la función *fmincon* de *Matlab*. A continuación se puede ver un pequeño programa hecho para este fin:

```
% Función para ajustar los parámetros de la capacidad de la baterías según
% "Dynamical Models of Lead-Acid Batteries:Implementation Issues, Stefano
% Barsali y Massimo Ceraolo"

%      New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries, Massimo Ceraolo
% X es un vector de 4 componentes:
%   X(1)=Kc;
%   X(2)=C_O;
%   X(3)=epsilon;
%   X(4)=delta;
clc;
clear all;

% A continuación se definen los valores de partida para la interpolación de
% los parámetros. Los valores de partida son los dados en los artículos en
% combinación con los proporcionados por el datasheet.
%      Kc      C_O      epsilon      delta      Iavg      T_f
Xo=[2.025167    170    0.48    0.226    14    -35 ];

% limite inferior de los parametros
lb=[1 10 0 0 10 -45]
% limite superior de los parametros
ub=[3 250 2 2 14 -25]

options=optimset('Display','iter','MaxIter',10000,'MaxFunEvals',50000,'TolFun',1e-9);
%
%
[X,fval]=fmincon('funcion_error',Xo,[],[],[],[],lb,ub,[],options)
```

En el programa anterior se debe introducir unos valores iniciales (vector X), esos valores son los obtenidos en los artículos de partida en combinación con los proporcionados por el datasheet de las baterías. También se tiene que indicar el límite superior (ub) e inferior (lb). Con estos límites se puede fijar el valor algunos de los parámetros de la función de coste, como por ejemplo la intensidad entorno a la cual quiere optimizar el modelo, 'Iavg', o la temperatura de congelación del electrolito, 'T_f'.

El programa anterior llama a una función de coste que calcula la diferencia en términos de error absoluto entre la capacidad real y la obtenida mediante la fórmula empírica $C(I, \theta)$, dicha función se muestra a continuación:

```
%% Definicion de la funcion objetivo

function obj=funcion_error(parametros)
length(parametros);
Kc = parametros(1);
Co = parametros(2);
epsilon = parametros(3);
delta = parametros(4);
Iavg=parametros(5);
T_f=parametros(6);

% Datos de descarga obtenidos en los ensayos
tiempo=[10 10.68 10 8.6];
Ah=[135.6 144 141.7 118.4];
% Valores de la intensidad de descarga del ensayo
A=[13 14 17 20];
% Valores de temperatura media durante el ensayo
Tmra=[28.65 28.7 28.8 28.65];
obj=sum(abs(Ah-((Kc*Co*(1-Tmra./T_f).^epsilon)./(1+(Kc-
1)*((A./Iavg).^delta)))));
end
```

Ejecutando las líneas de código anteriores se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 6.1-Parámetros referentes a la capacidad de las baterías

	K_c	C_0^* [Ah]	ϵ	δ	I^* [A]	θ_f [°C]
X =	1.4310	117.2595	0.3652	1.5153	14	-38.0140
fval =	24.1959					

En las líneas de código anteriores se ha establecido en 14A el valor de la intensidad entorno a la cual se quiere optimizar el modelo. Lo ideal hubiera sido establecer dicho valor en 50A, que es la intensidad a la que trabaja el vehículo eCARM en carga, pero al no disponer de datos referentes a dicho régimen de descarga la segunda parte de la identificación del modelo no se podría haber llevado a cabo.

En la segunda fase se realiza la identificación de los demás parámetros del modelo. Para ello se implementa el modelo de las baterías en *Matlab/Simulink*, y mediante el toolbox "Control and Estimation Tools Manager" se ajusta los parámetros restantes del modelo a los datos obtenidos en los ensayos.

Con vista a facilitar la identificación, en el modelo implementado para este proceso se sustituye el modelo térmico del diagrama de la figura 4.4 por la entrada de temperatura cuyo valor se mide durante los ensayos. El diagrama de bloques del modelo simplificado se puede observar en la figura 6.1.

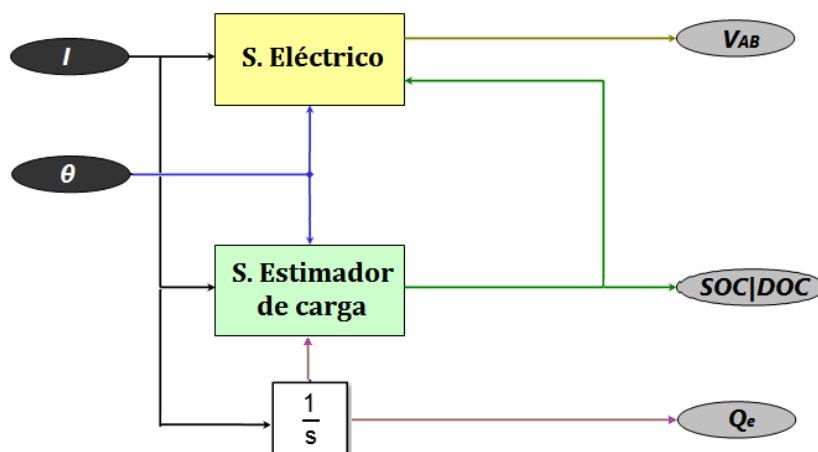


Figura 6.1-Diagrama de bloques del modelo simplificado.

Los datos utilizados para la identificación del modelo son los correspondientes al ensayo 4.3V de consigna de pedal. De estos datos se ha eliminado la parte inicial correspondiente a la descarga de las dos baterías, realizando de esta manera un ajuste de los parámetros sin influencia por parte de dichas baterías.

Los valores de los parámetros obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 6.2-Parámetros referentes a la rama principal de las baterías

$E_{mo}[V]$	K_E	$R_{00}[\Omega]$	$R_{10}[\Omega]$	A_0	$R_{20}[\Omega]$	A_{21}	A_{22}	$\tau_1[s]$
45.2	0.013	0.021	0.032	-0.593	0.754	-7.56	-8.15	1550.86

Para el la identificación de los parámetros de la rama parásita y los del modelo térmico, tabla 6.3, se ha utilizado el modelo completo, cuyo diagrama detallado se puede ver en la figura 6.2.

Tabla 6.3-Parámetros referentes a la rama parásita y al modelo térmico de las baterías

$E_p[V]$	V_{p0}	A_p	$R_\theta[^\circ C/Watio]$	$C_\theta[J/^\circ C]$
1.5	0.1051	2.08	1.12	13300

Una vez identificados los parámetros se pasa a la validación del modelo para los 4 ensayos de descarga realizados.

6.1.1.1. Simulación descarga ensayo 4V consigna de pedal

En primer lugar se analiza el comportamiento del modelo frente a la salida de tensión:

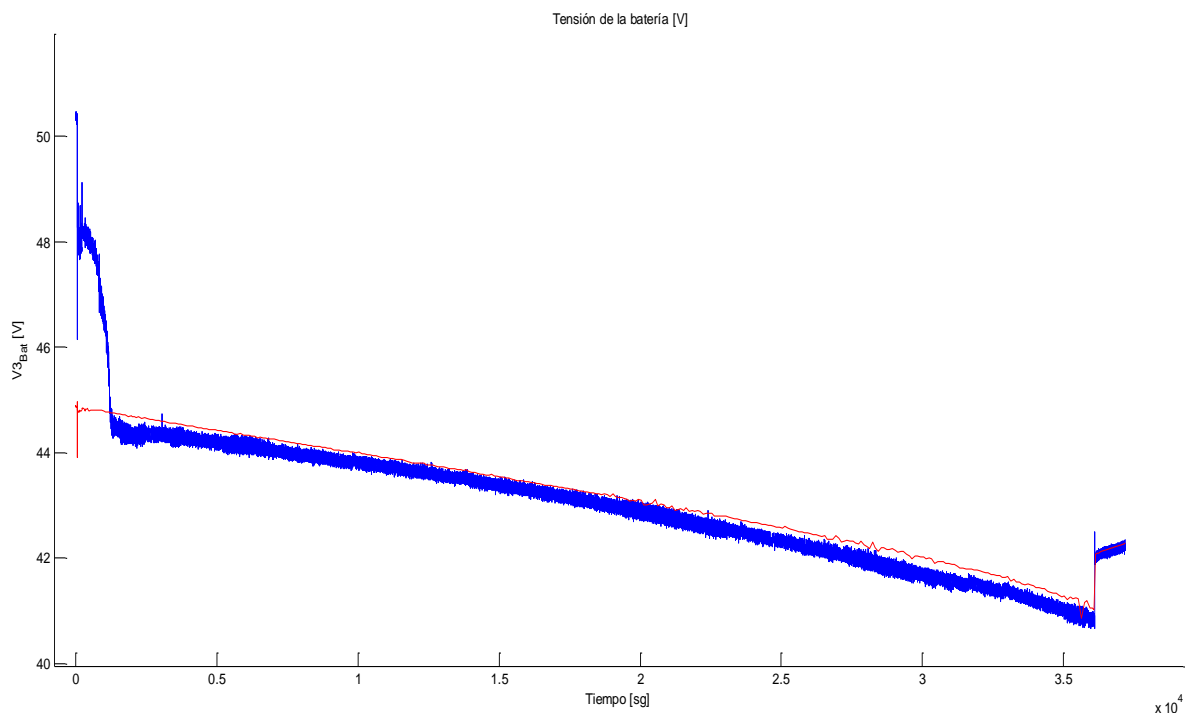


Figura 6.3-Validación descarga ensayo 1

Como era de esperar, al no tener en cuenta la descarga de las dos baterías para el ajuste del modelo la curvatura inicial de la salida en tensión (figura 6.3) no es reflejada por el este. Como consecuencia de ello la tensión de circuito abierto tampoco coincide, pero pasada la primera fase de descarga de la simulación, se tiene una buena correspondencia entre la salida simulada y los datos reales.

En el tramo final de la simulación se presenta un aumento del error, pero el perfil de la curva de recuperación de tensión de las baterías es reproducido a la perfección por el modelo.

Una vez validado el modelo con la salida en tensión, se muestra la respuesta en simulación de las demás variables de salida (figura 6.4).

La salida de carga extraída, al ser función de la entrada de intensidad, alcanza los mismos valores que en los ensayos.

El aumento de temperatura simulado por el modelo es ligeramente superior al del ensayo real, pero se trata de diferencias del orden de las décimas.

Por último, en la parte inferior de la figura 6.4 se tiene el SOC y el DOC de las baterías. La variación es lineal en ambos casos, como consecuencia de una descarga a intensidad constante. El SOC indica que las baterías se han descargado aproximadamente hasta el 35% de su capacidad máxima. Y el DOC indica un 5% de carga útil restante en las baterías, con referencia al régimen de descarga actual.

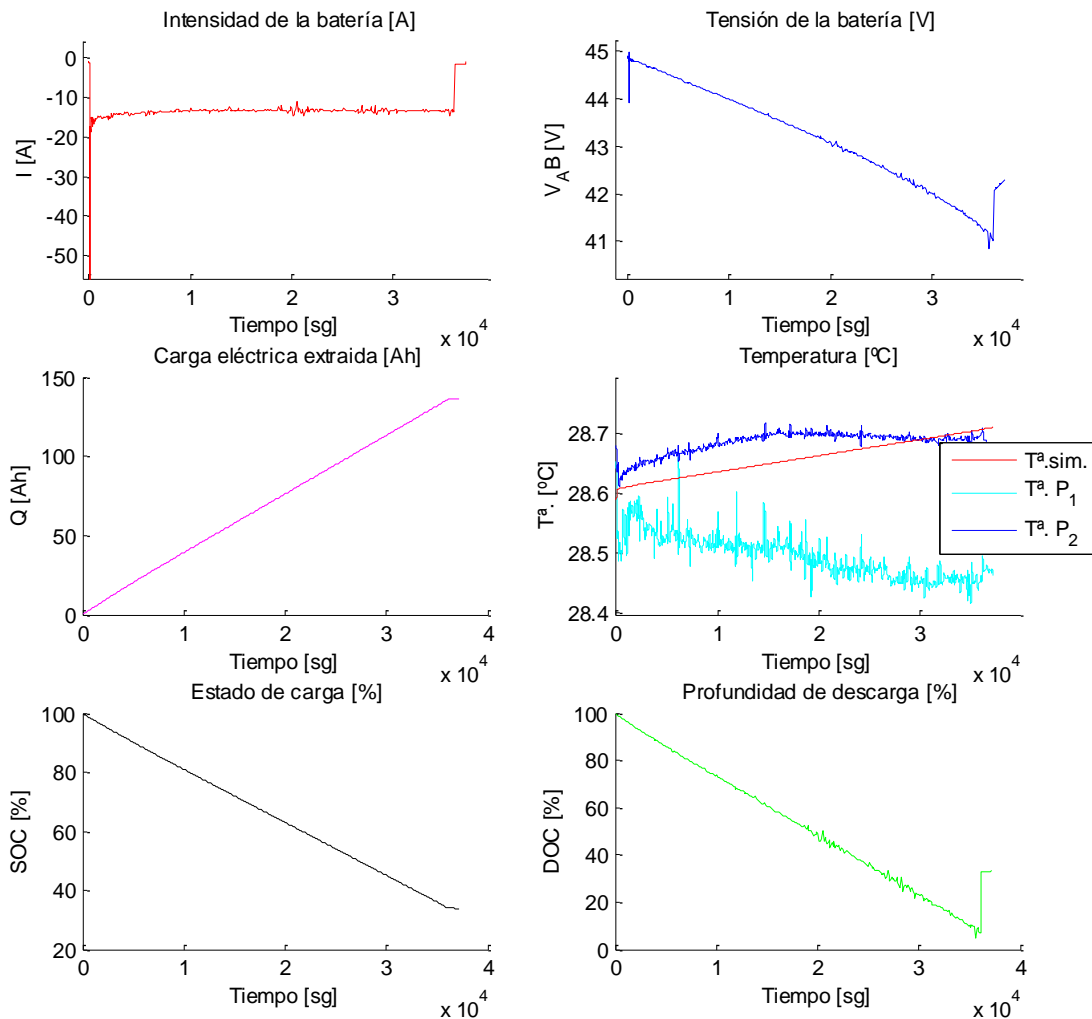


Figura 6.4-Salidas simulación-descarga ensayo 1

6.1.1.2. Simulación descarga ensayo 4.3V consigna de pedal.

La figura 6.5 muestra los resultados de la salida en tensión del modelo. El desajuste del primer tramo es reflejo de lo comentado en la anterior simulación. Pasando al tramo intermedio nos encontramos con un mejor ajuste al del caso anterior, pero sucede todo lo contrario con la curva de recuperación, situándose el modelo 0.7V por encima del valor real.

Analizando las demás salidas del modelo, figura 6.6, vemos como la temperatura simulada toma valores muy cercanos a la real, el SOC disminuye al 30% y la carga útil disponible si sitúa en el valor escaso de 2%.

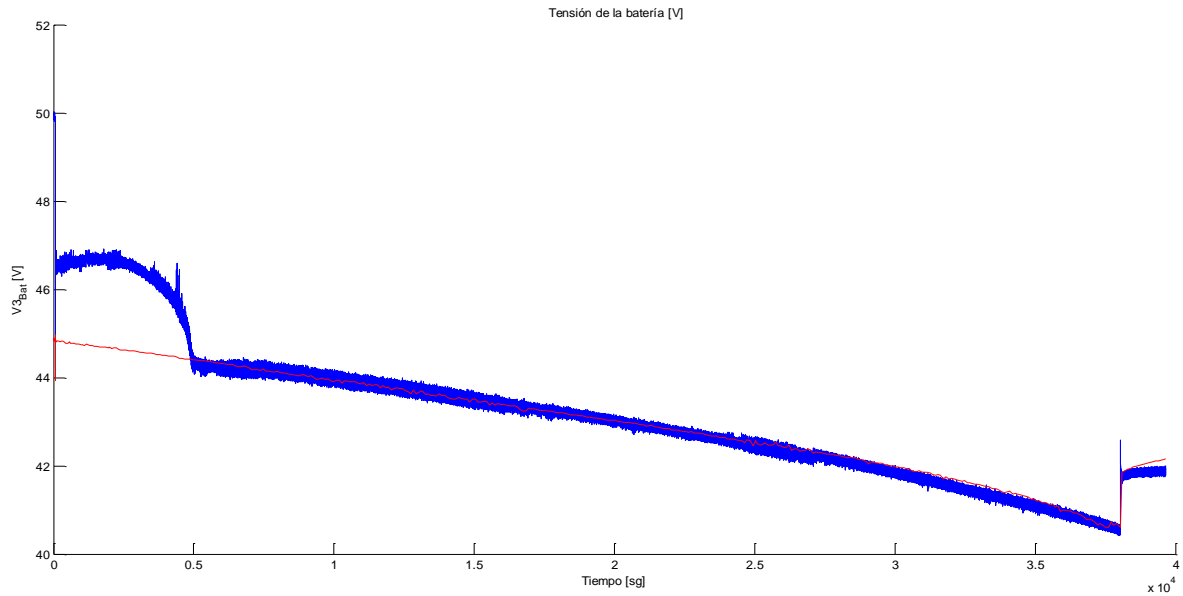


Figura 6.5-Validación descarga ensayo 2

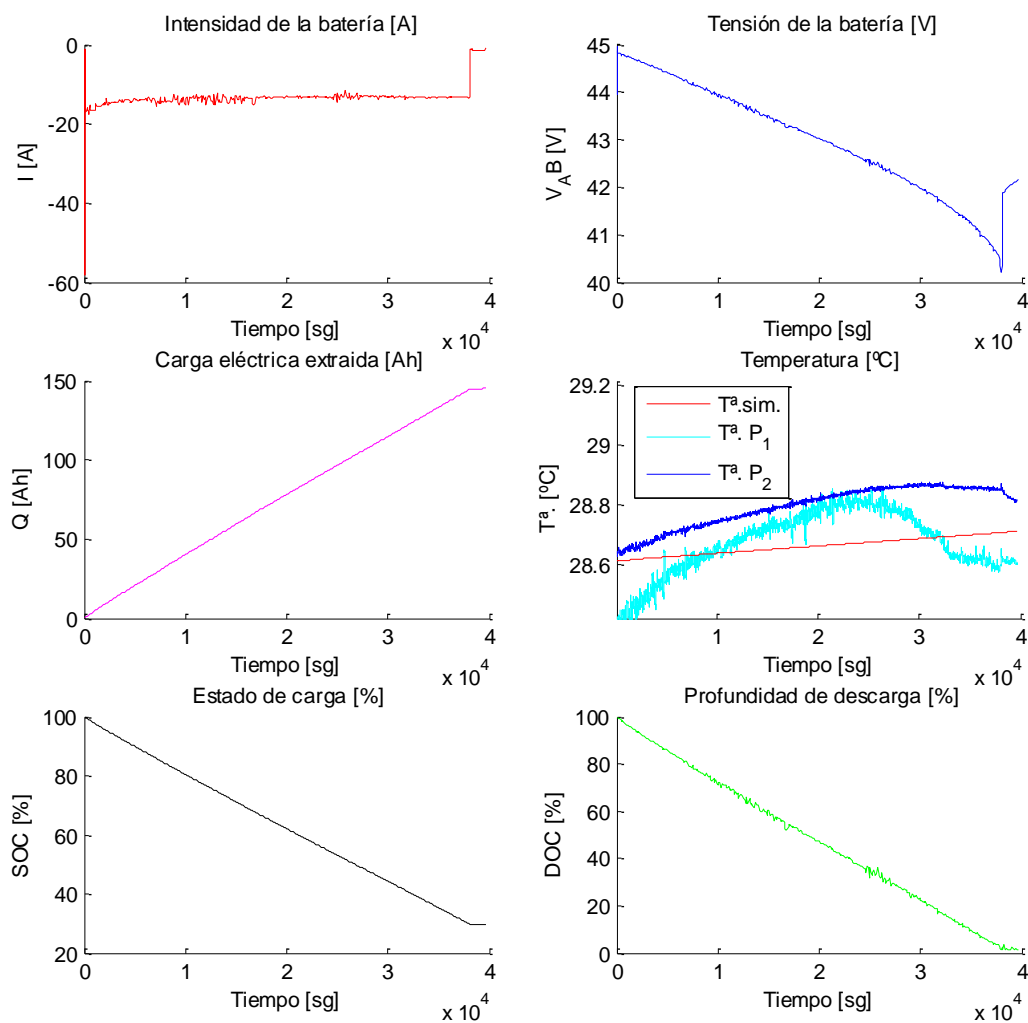


Figura 6.6-Salidas simulación-descarga ensayo 2

6.1.1.3. Simulación descarga ensayo 4.4V consigna de pedal.

El modelo no está preparado para contemplar las pérdidas de tensión debidas a fallos de baterías en mal estado, como consecuencia de ello el modelo obtenido en esta simulación (figura 6.7) dista mucho de los datos reales.

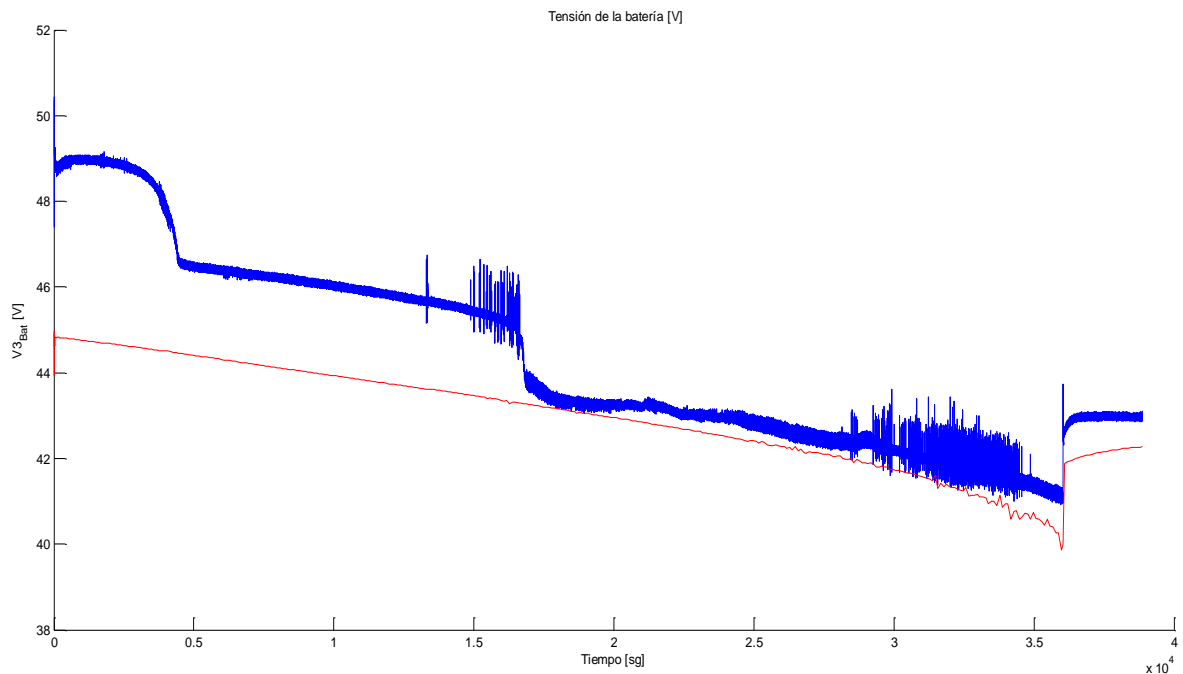


Figura 6.7-Validación descarga ensayo 3

Por otro, lado haciendo el análisis de las demás variables (figura 6.8) se observa como la temperatura mantiene un buen nivel de aproximación en cuanto al valore presentado, pero sin capturar la dinámica de los datos reales.

Al descargar las baterías a una intensidad aun mayor al anterior ensayo, el SOC disminuye hasta el 30%, y el DOC indica un 0.88%, es decir, la batería prácticamente no dispone de carga útil.

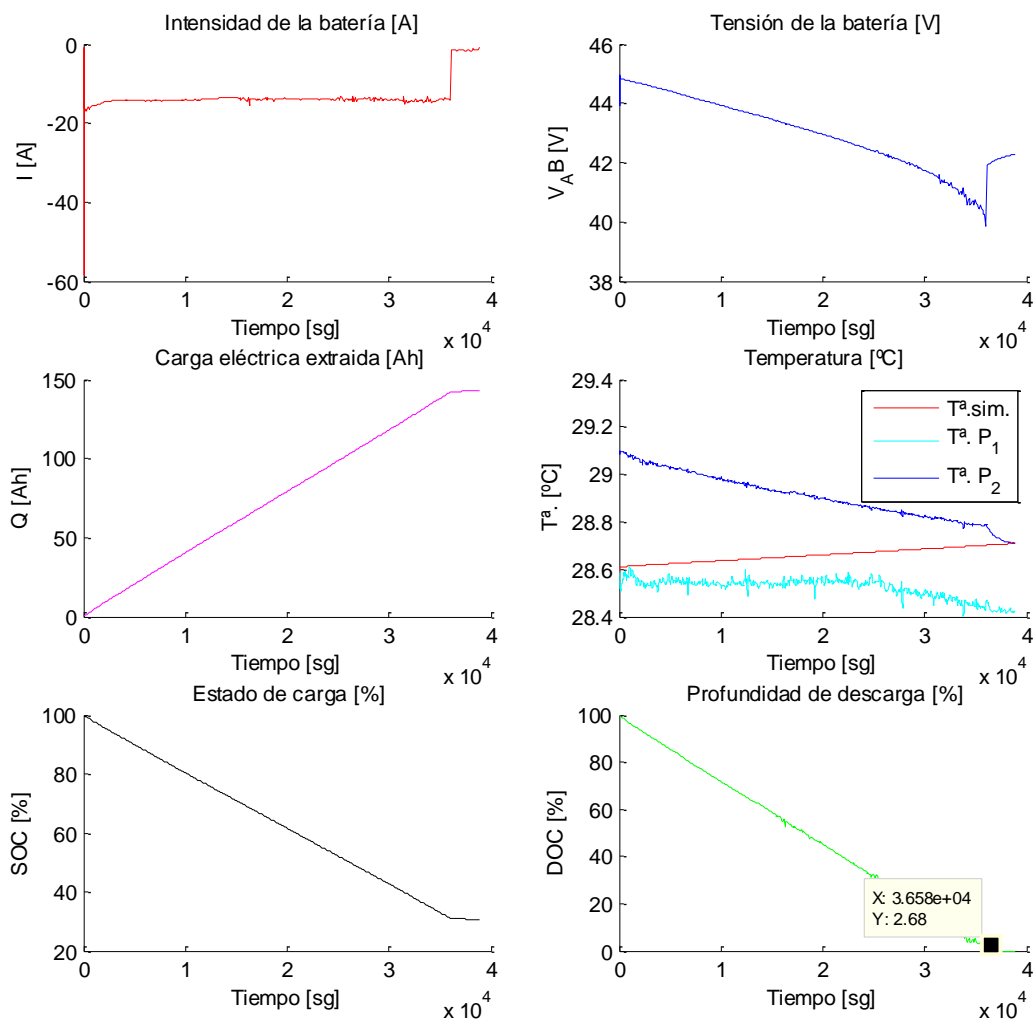


Figura 6.8-Salidas simulación-descarga ensayo 3

6.1.1.4. Simulación descarga ensayo 4.5V consigna de pedal.

Al igual que en el anterior ensayo, se tiene una gran diferencia entre las dos señales (figura 6.9) pero a diferencia de lo anterior en esta simulación el modelo se sitúa por encima de los datos reales.

En cuanto a las demás salidas del modelo (figura 6.10) se ha de señalar el comportamiento del DOC. El pulso presente en la señal del DOC es un reflejo directo de la estrecha relación de este con el régimen de descarga, para una intensidad de descarga menor el valor del DOC es mayor, es decir, la carga útil disponible en las baterías es mayor.

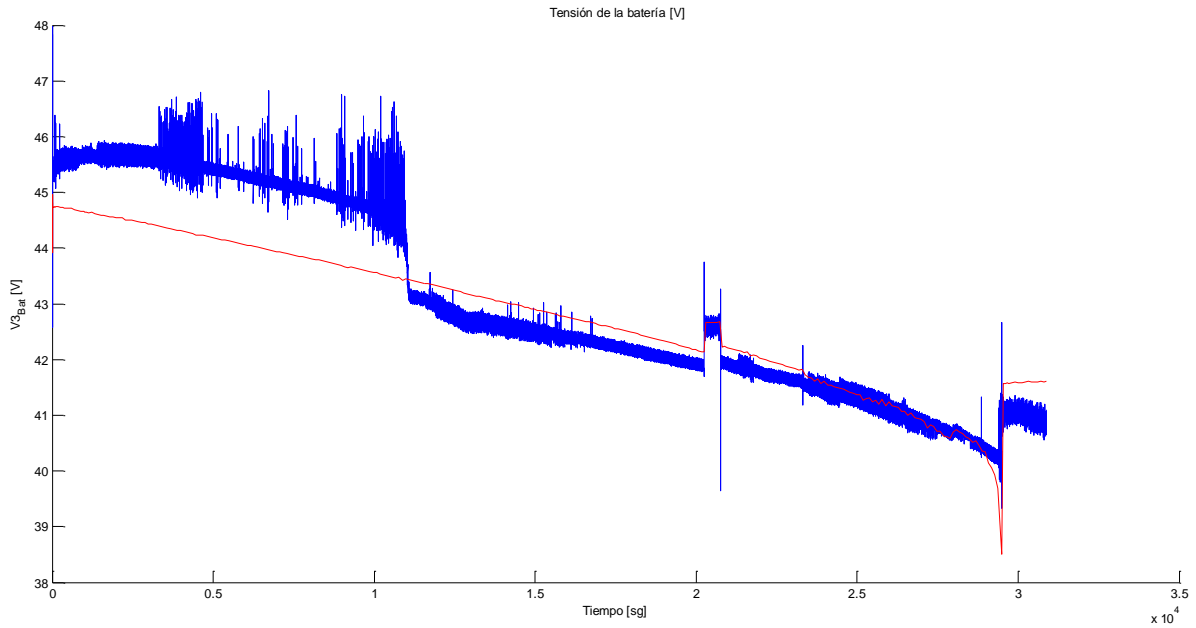


Figura 6.9-Validación descarga ensayo 4

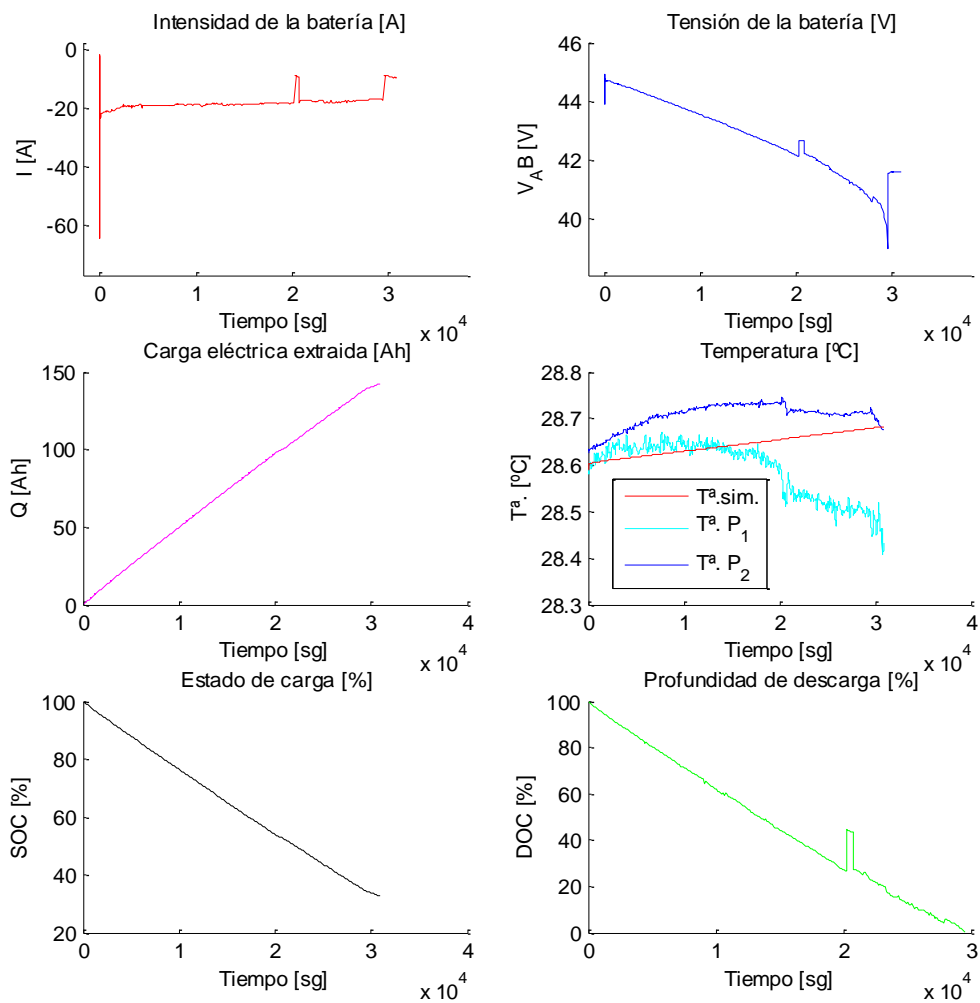


Figura 6.10-Salidas simulación-descarga ensayo 4

6.1.1.1. Simulación carga.

Como la carga viene impuesta por el cargador del vehículo eCARM y sigue el mismo perfil para todos los ensayos, solo se presenta la simulación para una de las cargas (consigna pedal 4V), y además solo para la primera fase de carga IU1a.

La curva de tensión (figura 6.11) no se aproxima muy bien a los datos reales, se presenta una diferencia de alrededor de 6V a lo largo de toda la simulación, aunque el perfil tiende a parecerse al de la curva real. El hecho de tener un perfil parecido sugiere que para el caso de unas baterías en buen estado, el modelo identificado para la descarga sería también válido para el proceso de la carga controlada en intensidad, tal como demuestran en los artículos del [18] y [19].

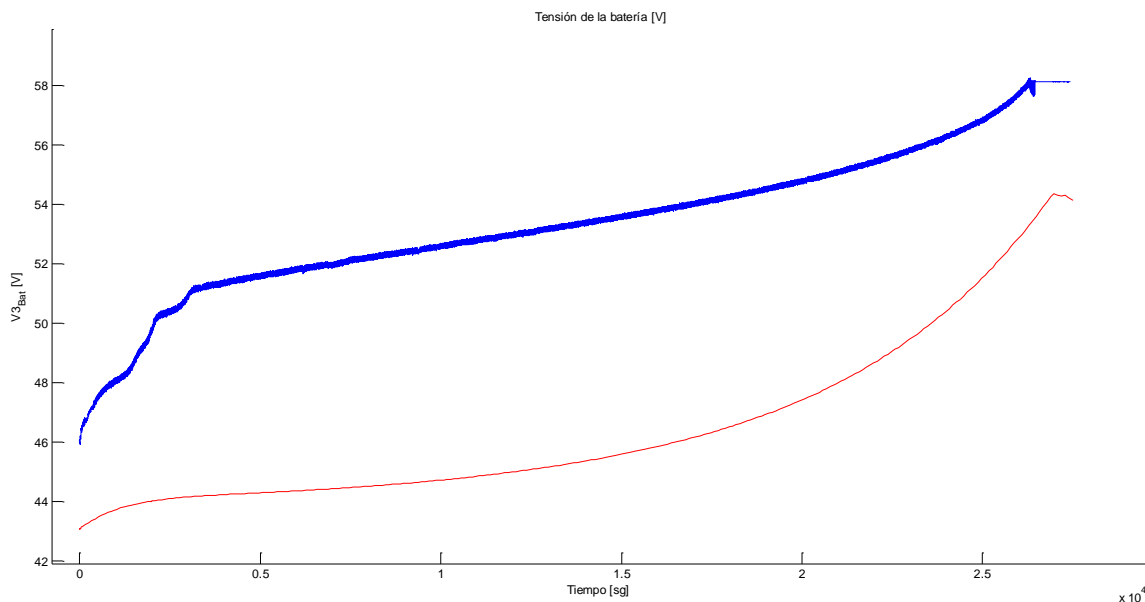


Figura 6.11-Simulación de la tensión de carga..

Las salidas de DOC y SOC (figura 6.12) de esta simulación indica que bastaría con esta primera fase de carga a intensidad constante para tener las baterías cargadas al 100%,

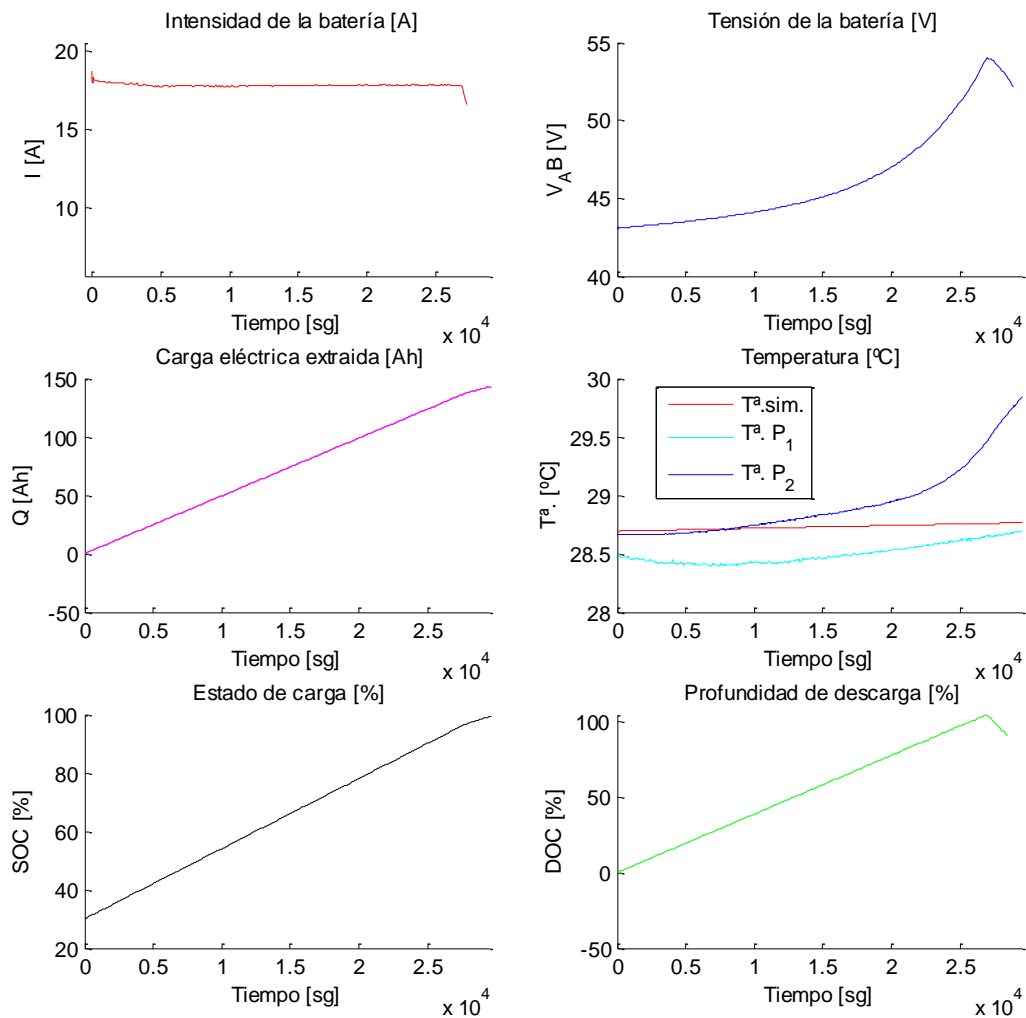


Figura 6.12-Simulación de la tensión de carga.

6.2. CÁLCULO DE PARÁMETROS.

Según se comenta en los capítulos anteriores, la dinámica del modelo del controlador Curtis para la salida en tensión viene descrita por una función de primer orden con ganancia y constante de tiempo variable.

Al tener la salida en tensión ganancia variable de forma exponencial, se tiene que el "THROTTLE MAP" del controlador se encuentra en una configuración distinta a la del 50% (configuración de salida lineal).

Sabiendo que la ganancia es variable en función del mapa de aceleración, y teniendo en cuenta que el comportamiento de la ganancia cambia en el 50% del valor de entrada de aceleración, se propone un modelado en dos intervalos, utilizando una función de transferencia de primer orden para cada intervalo. Dicha función de transferencia a su vez tiene una ganancia y una constante de tiempo variable en función de la entrada del pedal/acelerador. En la figura 6.12 se tiene un diagrama del modelo implementado en simulación.

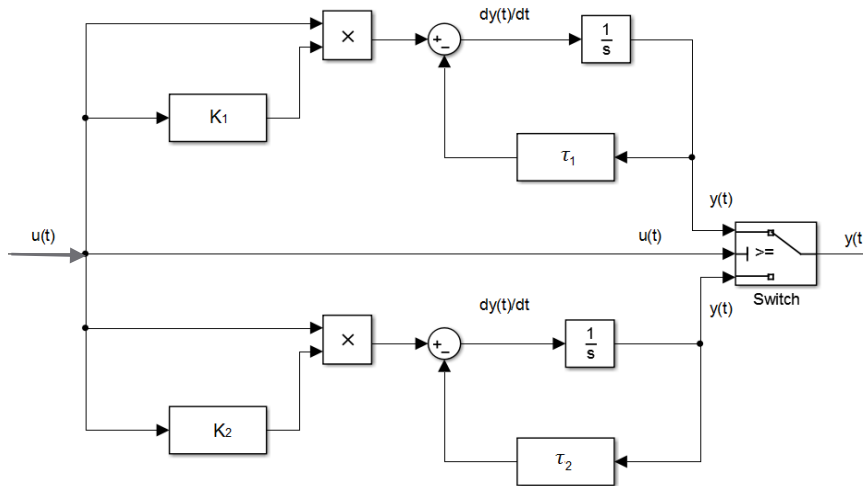


Figura 6.13-Diagrama modelo controlador Curtis.

Implementado el modelo en *Simulink*, y con ayuda del *toolbox* de *Matlab* "*Control and Estimation Manager*" se identifican los parámetros del polinomio de cuarto orden que mejor ajusta el valor de la ganancia en función de la entrada, y los parámetros de la ecuación lineal que define la constante de tiempo.

La figura 6.14 muestra los resultados obtenidos en el proceso de identificación del modelo para el modo de funcionamiento 1 del controlador. El valor obtenido para la función de coste es de 3150.4.

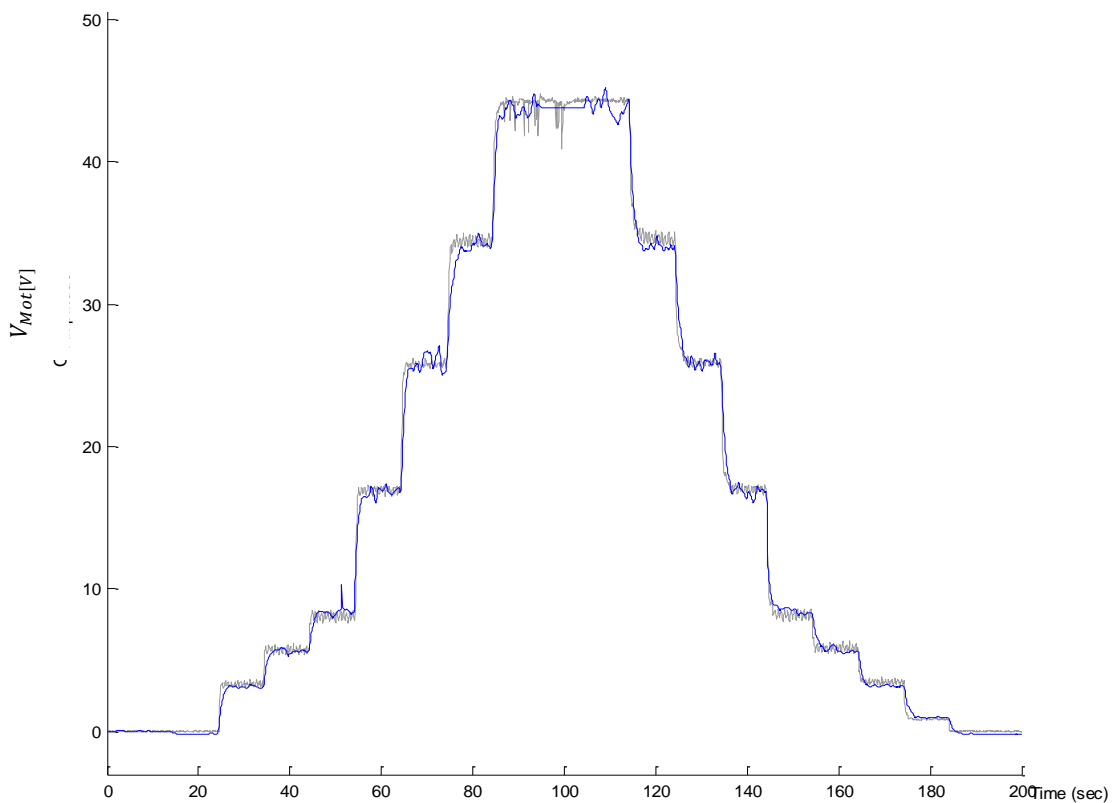


Figura 6.14-Salida del modelo identificación modo 1.

Los valores identificados para el polinomio de la ganancia son:

- $\leq 50\% \rightarrow K_1 = 0.35 u(t)^4 - 2.11 u(t)^3 + 3.59 u(t)^2 + 1.38 u(t) - 1.83$
- $> 50\% \rightarrow K_2 = 2.19 u(t)^4 - 32.7 u(t)^3 + 187 u(t)^2 + 1.38 - 500 u(t) - 1.83$

Los valores identificados para el polinomio de la constante de tiempo son:

- $\leq 50\% \rightarrow \tau_1 = 1.41 u(t) - 0.0017$
- $> 50\% \rightarrow \tau_2 = 1.42 u(t) + 279$

Una vez identificados los parámetros del modelo, se realiza la validación del mismo obteniendo una función de coste de 4210.8. En la figura 6.15 se comprueba el ajuste del modelo obtenido.

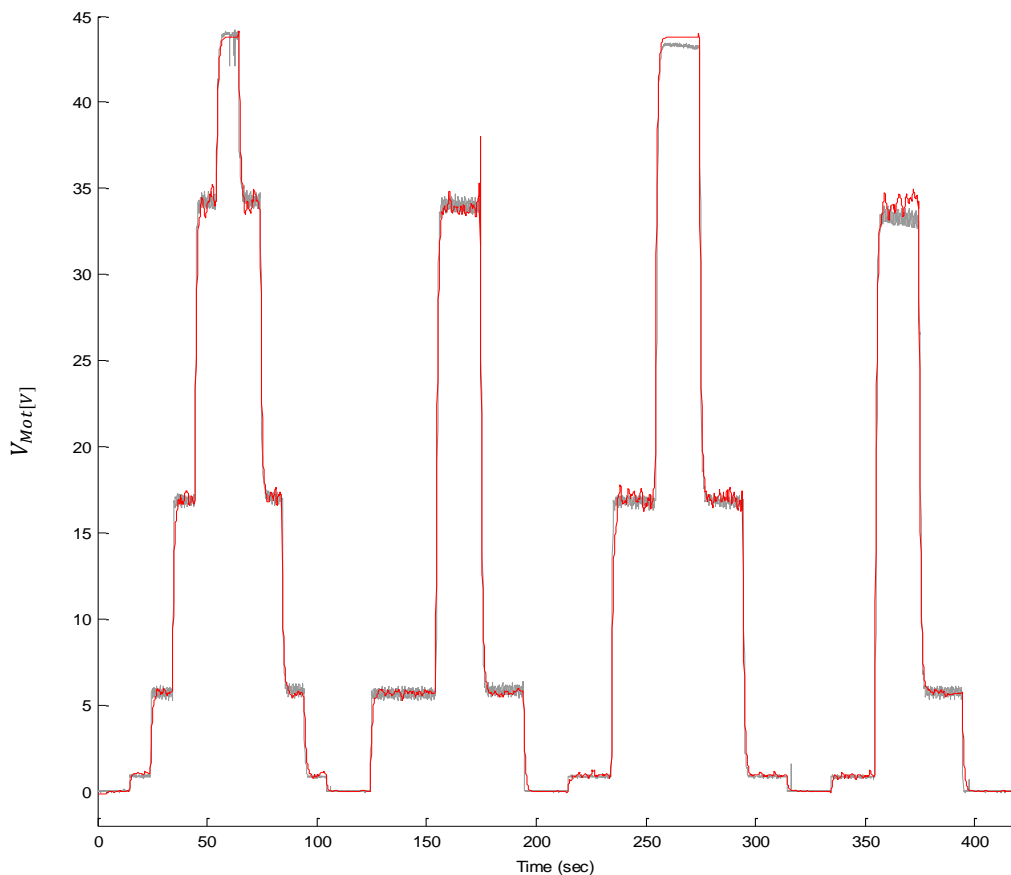


Figura 6.15-Salida del modelo validación modo 1.

Identificado y validado el modelo del modo de funcionamiento 1, se pasa a la identificación del modo 2. La figura 6.16 se muestra los resultados obtenidos en el proceso de identificación del modelo en modo de funcionamiento 2 del controlador, con una función de coste de 2503.

Los valores identificados para el polinomio de la ganancia son:

- $\leq 50\% \rightarrow K_1 = 1.29 u(t)^4 - 8.21 u(t)^3 + 16.9 u(t)^2 - 9.04 u(t) + 0.834$
- $> 50\% \rightarrow K_2 = -0.18 u(t)^4 + 0.29 u(t)^3 + 9.56 u(t)^2 - 40.8 u(t) + 57.2$

Los valores identificados para el polinomio de la constante de tiempo son:

- $\leq 50\% \rightarrow \tau_1 = 1.98 u(t) 0.0025$
- $> 50\% \rightarrow \tau_2 = 1.81 u(t) + 11.57$

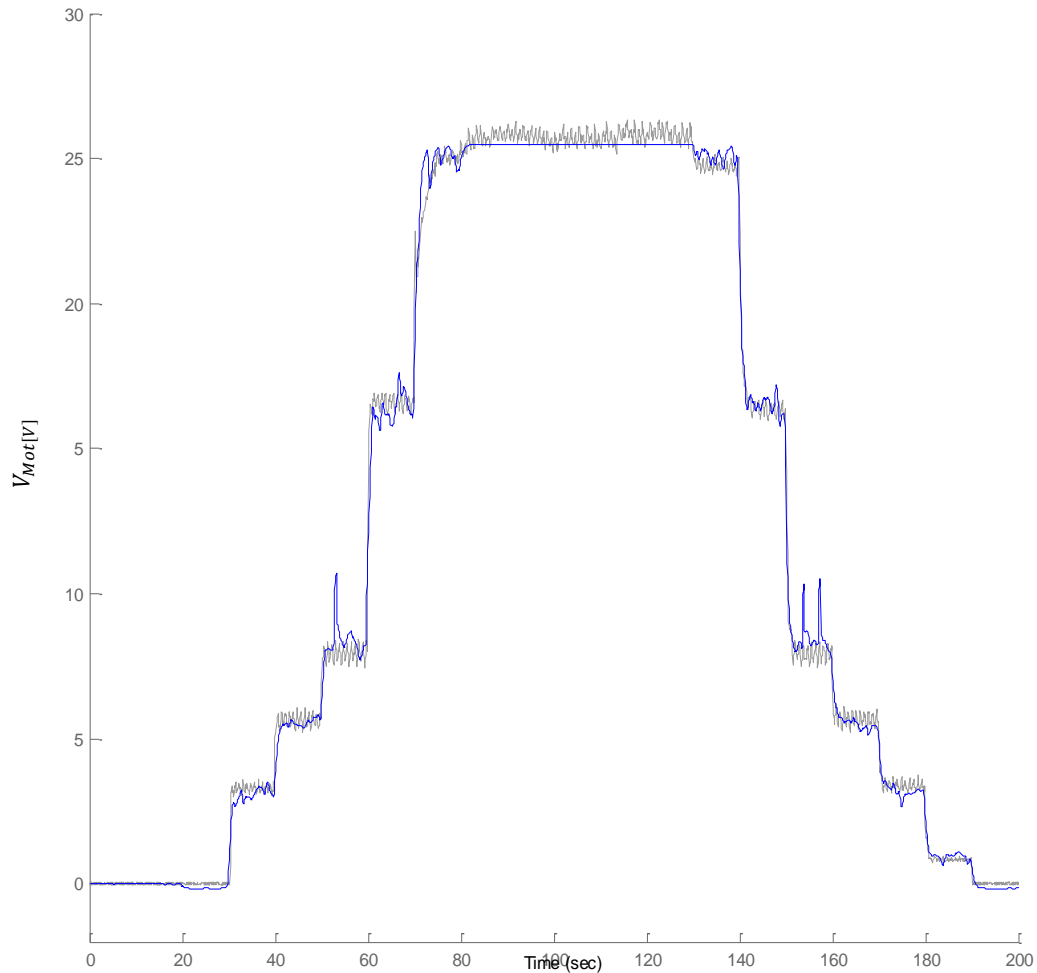


Figura 6.16-Salida del modelo identificación modo 2.

Una vez identificados los parámetros del modelo, se realiza la validación del mismo obteniendo una función de coste de 3407. En la figura 6.17 se comprueba el ajuste del modelo a los datos reales.

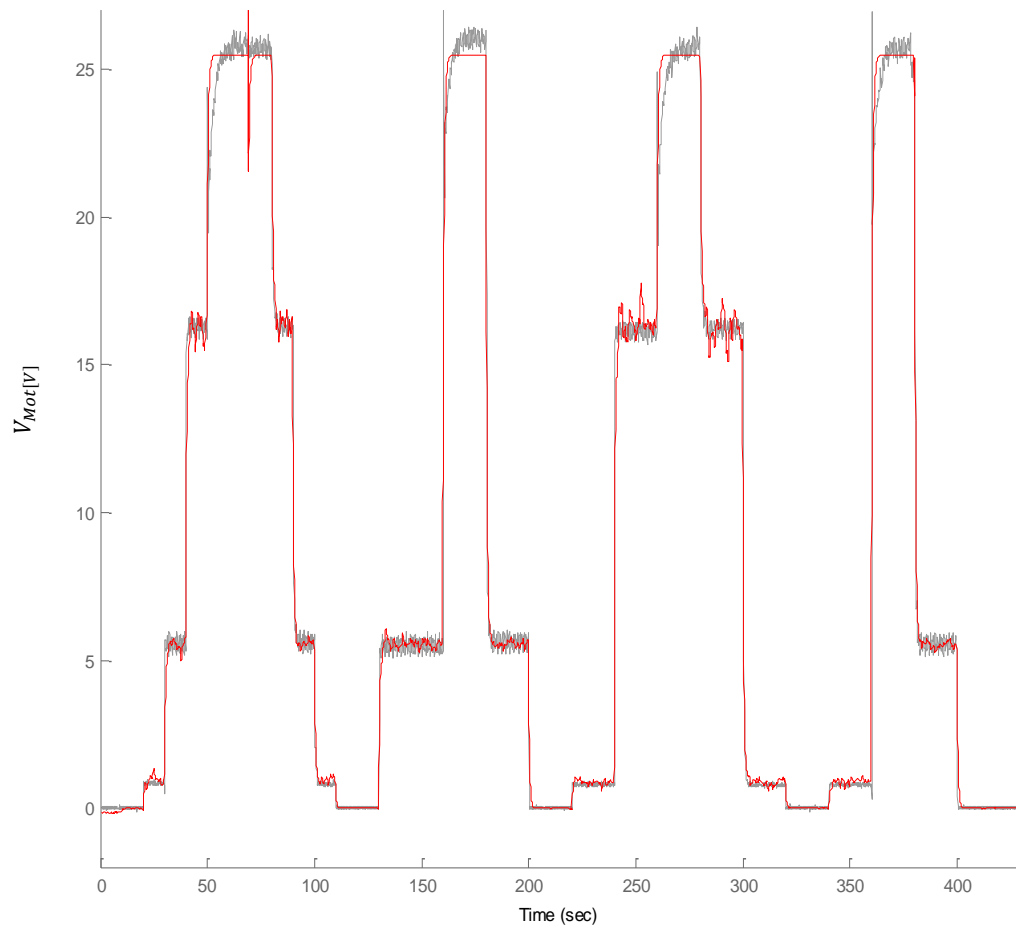


Figura 6.17-Salida del modelo validación modo 2.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1. CONCLUSIONES

Por un lado, el modelo de las baterías proporciona, utilizando los parámetros fijos, una precisión suficiente para el objetivo marcado de partida: su uso en simulaciones de diferentes estrategias de control y topologías de almacenamiento de energía. Por otro lado, el modelo del controlador presenta la capacidad de simular el comportamiento de la salida en tensión frente a la entrada del pedal, proporcionando información referente a la excitación en tensión del motor del vehículo *eCARM*.

Las descargas realizadas no abarcan todo el rango de intensidad de las baterías, porque para ello se debe emplear un dispositivo que permita recorrer dicho rango, del que no se dispone. La intensidad entorno a la cual se ha optimizado el modelo debe situarse en el valor de trabajo típico de las baterías, que debe establecerse según el uso que se dé a éstas. Además, se debe comprobar el buen estado de funcionamiento de todo el conjunto de baterías, en todo el rango de trabajo antes de proceder a realizar los ensayos.

La temperatura del electrolito presenta diferencias de una batería a otra, por ello en cada ensayo se ha de medir la temperatura del electrolito para cada una de ellas. La temperatura ambiente es un factor de gran relevancia a la hora de realizar los ensayos, por ello se debe mantener constante, tanto durante el proceso de descarga como el de carga.

Entre las ventajas de este modelo de las baterías puede señalarse su sencillez, exactitud para un determinado rango de salida, que al estar expresado en términos de un circuito equivalente puede simularse de manera casi inmediata en programas CAD eléctricos, y que la interpretación física de los parámetros que intervienen en el modelo es intuitiva.

De acuerdo con los resultados de los experimentos, el paso crítico para utilizar este modelo es el cálculo de la capacidad máxima de las baterías. La mejora de este modelo pasa, inicialmente, por la sustitución del conjunto de baterías y a continuación mejorar el proceso y las condiciones de los ensayos. El modelo obtenido se ha podido comprobar para procesos de descarga, quedando pendiente la tarea de validar dicho modelo para procesos de carga.

En cuanto al controlador, éste proporciona una entrada que permite la programación y monitorización de varios parámetros especificados en el datasheet,

dicha entrada se debe aprovechar para ver la configuración interna del mismo y en base a ello caracterizar de forma más efectiva todas las prestaciones ofrecidas por el controlador, y al mismo tiempo, en caso de ser necesario, realizar un ajuste de la configuración más óptimo. Son puntos a sopesar en un futuro.

El modelo del controlador solo representa una pequeña parte del arduo trabajo de caracterización del controlador, pero todo lo analizado en esta primera parte facilita y encamina un futuro trabajo centrado en determinar por completo el funcionamiento y las prestaciones del controlador.

7.2. TRABAJOS FUTUROS

Como paso previo a cualquier acción futura, se ha de adquirir un nuevo conjunto de baterías que proporcionen una carga estable y proceder al modelado del mismo, en base a las consideraciones comentadas anteriormente, y verificar con ello de forma precisa la eficiencia y validez del método empleado en este trabajo. Dependiendo del tipo de acumuladores adquiridos, se debe prestar una mejor atención al mantenimiento, aunque este sea bajo, y tener en cuenta que el almacenamiento sin uso es más perjudicial que un uso frecuente.

En cuanto al controlador, el primer paso a realizar es tener acceso sobre la parte programable, lo cual es necesario tanto para identificar la configuración actual como para activar y programar las demás funciones que ofrece el controlador *Curtis*, resaltando el control en velocidad y la salida para instalar un freno electromecánico.

En paralelo a estas tareas se ha de desarrollar los demás modelos que definen la dinámica del vehículo para obtener un modelo global del comportamiento del mismo, con vista a la integración del vehículo *eCARM* en el estudio de modelos energéticos y conceptos de eficiencia energética, como por ejemplo el concepto V2G (*Vehicle to Grid*), el cual describe un sistema en el cual la energía puede ser vendida a la red eléctrica por el conductor de un vehículo todo-eléctrico o híbrido enchufable, cuando este es conectado a la red en los momentos que no se use para el transporte.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. J. Gutiérrez y J. C. García, «Cambios en la movilidad en el área metropolitana de Madrid: el creciente uso del transporte privado,» *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, vol. 25, pp. 331-351, 2005.
- [2]. Diego Vizcaíno, Casilda Cabrerizo. *Guía para la introducción del vehículo eléctrico en entornos urbanos*. IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la energía). 2011.
- [3]. Changzhou Greenland Vehicle Co., Ltd, [Web/URLs]: http://www.gl-ev.com/en/pro_show.php?Id=155. [Último acceso: 20 08 2014].
- [4]. J. L. Torres, R. González, A. Giménez y J. López, «Energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. A comparative study,» *Applied Energy*, vol. 113, nº 81, pp. 816-824, 2014.
- [5]. Colaboradores de Wikipedia. Diagrama de Gantt [Internet]. Wikipedia, La enciclopedia libre; 2014 sep 2, 17:45 UTC [cited 2014 sep 17]. [Web/URLs]: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagrama_de_Gantt&oldid=76738098. [Último acceso: 15 09 2014].
- [6]. Berndt, Kiehne, H. A., "Electrochemical Energy Storage", Cap. 1, *Battery Technology Handbook*, Marcel Dekker Inc., New York, (2003).
- [7]. Seth Leitman, Bob Brant, "Build Your Own Electric Vehicle", Segunda edición, McGraw-Hill, 2009.
- [8]. D. Linden, "Handbook of Batteries and Fuel Cells, Chapter 23", (Ed.), McGraw-Hill, New-York, 1984.
- [9]. "Manual de Baterías Bosh", Bosh 6008 FP1 804, 2014.
- [10]. Nazih Moubayed, Janine Kouta, Ali El-Ali, Hala Dernayka y Rachid Outbib, "Parameter Identification of the lead-acid battery model", *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008.
- [11]. Cole, Bruce, et al., "Operational Characteristics of VRLA Batteries Configured in Parallel Strings ", GNB Technologies.
- [12]. RegenBat, [Web/URLs]: <http://www.regenbat.com/tipos-de-baterias-regenbat-regeneracion-baterias.php>, [Último acceso: 28 08 2014].

- [13]. "Guía para prueba de baterías", Megger (certificado de acuerdo a ISO 9001 y 14001), 2014.
- [14]. "IEEE Std 450™-2010 (Revisión de IEEE Std 450-2002)", IEEEExplore, New York, NY 10016-5997 USA, 25 Febrero 2011.
- [15]. "IEEE Std 1188™-2005 (Revisión de IEEE Std 1188-1996)", IEEEExplore, New York, NY 10016-5997 USA, 8 Febrero 2006.
- [16]. Ziyad M. Salameh, Margaret, A. Casacca William y A. Lynch, "A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries", Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Lowell, 1992.
- [17]. Giglioli, R., Buonarota, A., Menga, P., & Ceraolo, M. (1990, December). Charge and discharge fourth order dynamic model of the lead-acid battery. In The 10th International Electric Vehicle Symposium, Hong-Kong.
- [18]. Ceraolo, M. (2000). New dynamical models of lead-acid batteries. Power Systems, IEEE Transactions on, 15(4), 1184-1190.
- [19]. Barsali, S., & Ceraolo, M. (2002). Dynamical models of lead-acid batteries: implementation issues. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 17(1), 16-23.
- [20]. Barsali, S., & Ceraolo, M. (2002). Dynamical models of lead-acid batteries: implementation issues. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 17(1), 16-23.
- [21]. Changzhou Greenland Vehicle Co., Ltd, [Web/URLs]: http://www.glev.com/en/pro_show.php?id=155.
- [22]. N. Moubayed, J. Kouta, Ali El-Ali, H. Dernayka y R. Outbib, "Parameter identification of the lead-acid battery model", Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Lebanon, Laboratory of Sciences in Information and Systems (LSIS), Universidad Aix-Marseille III-Francia.
- [23]. Á. Soriano, "Control distribuido y coordinación de robots mediante sistemas multiagente", Universidad de Valencia, Valencia, 2011.
- [24]. Grupo de Investigación MAPIR (Universidad de Málaga), Grupo de Investigación ARM (Universidad de Almería), "Open Mobile Robot Architecture (OpenMORA)", 21 09 2010. [Web/URLs]: <http://sourceforge.net/projects/openmora/>. [Último acceso: 31 08 2014].
- [25]. P. M. Newman, "MOOS-mission orientated operating suite", Massachusetts Institute of Technology, 2006.

- [26]. J. L. Blanco y y. otros, "Mobile Robot Programming Toolkit (MRPT)",
[[Web/URLs]: <http://www.mrpt.org/>. [Último acceso: 30 08 2014].
- [27]. Curtis Instruments, INC., 1268 Manual, p/n 37873 Rev. C: February 2011.
[Web/URLs]:<http://curtisinstruments.com/index.cfm?fuseaction=cDataSheets.dspHome&SiteID=1&langID=9>, [Último acceso: 10 09 2014].
- [28]. GreenSaver Corporation [Web/URLs]: http://tech-mobile.hu/elemek/docs/szilikon_akku_adatlap_sp210-6.pdf, [Último acceso: 10 09 2014].
- [29]. [Web/URLs]:<http://www.norstarenergy.com/battery-solutions/all-products/greensaver-sp210-6/>, [Último acceso: 30 07 2014].
- [30]. Barr, M. (2001). Pulse width modulation. *Embedded Systems Programming*, 14(10), 103-104.
- [31]. Fernández Miaja, P., Rodríguez Alonso, A., Sebastián Zúñiga, F. J., & Rodríguez González, M. (2013). Comportamiento del convertidor reductor multifase como filtro de respuesta impulsiva finita. SAAEI 2013 (Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación, 10, 11 y 12 de julio de 2013, Madrid). Javier Aracil, Francisco Gordillo, "Dinámica de sistemas", Editorial Alinza.
- [32]. Ismael Guamani, M. Diseño e implementación de un módulo didáctico de un Drive Troceador para el control de una máquina de DC en cuatro cuadrantes destinado al Laboratorio de Control Eléctrico y PLC's. ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO, 55.
- [33]. Tulleken, H. J. (1993). Grey-box modelling and identification using physical knowledge and Bayesian techniques. *Automatica*, 29(2), 285-308.
- [34]. Benjamin C. Kuo, "Sistemas de Control Automático", Departament of Electrical and Computer Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, 7th Edición, PEARSON-Prentice Hall.
- [35]. C. Rodríguez, J. L. Guzmán, M. Berenguel, "Una metodología para el diseño de un controlador pi no-lineal. Aplicación a un sistema de tanques", Dep. Lenguajes y Computación, Universidad de Almería, XXXII Jornadas de Automática, Sep. 2011.
- [36]. H.A. Kiehne, "Battery Technology Handbook", Second Edition, Expert Verlag, Renningen-Malsheim, Alemania.
- [37]. Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), "Methods and Competencies - Charging Strategies", [Web/URLs]: http://www.isea.rwth-aachen.de/en/energy_storage_systems_methods_charging/. [Último acceso: 1 09 2014].

- [38]. Christopher D. Rahn,Chao-Yang Wang, "Battery Systems Engineering", The Pennsylvania State University, USA, A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2013.