



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

## **Estudio de factibilidad técnico-económica del diseño e implementación de un banco de baterías para un vehículo híbrido**

*Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.*

**Autores:**

Edgar Marcelo Bustamante Verdugo

C.I: 030189426-7

edgarbustamante77@gmail.com

Gilson Xavier Reibán Morocho

C.I: 010517503-8

xavier.reiban@hotmail.com

**Director:**

Ing. Luis Gerardo González Morales, Ph.D.

C.I: 172971105-9

**Cuenca - Ecuador**

**28 de agosto de 2020**





## Resumen

En este trabajo experimental de titulación se detalla el diseño e implementación de un banco de baterías de Li-ion como reemplazo del banco original de NiMH (Niquel-Metal-Hidruro) de un vehículo híbrido (Toyota Prius C). En el estudio se realizan análisis del desempeño en distintos entornos de conducción sobre los cuales un vehículo común puede transitar. También una comparación de presupuestos entre el reemplazo con la tecnología original en una importadora autorizada de la marca del vehículo contra los gastos que se realizaron durante el proceso de armado del nuevo banco de Li-ion.

Se detalla un estudio de las distintas familias o tipos de baterías de Li-ion en el mercado actual y el proceso de selección de la tecnología implementada para el nuevo banco.

Con el objetivo de acoplar de la forma más precisa posible el nuevo banco a la estructura original del vehículo, se describen todos los procesos y adaptaciones que se realizaron de tal forma que las celdas del nuevo banco no sufra ningún daño físico, que comprometan la vida útil y su rendimiento.

El rendimiento final obtenido del nuevo banco de baterías es comparado con el banco original mediante el ciclo de vida estimado y el ahorro de combustible presentado, al transitar con el vehículo por 3 rutas diferentes (centro urbano, carreta interprovincial, autopista). Durante el recorrido del vehículo los datos de velocidad, voltaje de celdas, estado de carga, corriente total del banco, temperaturas de los módulos, etc., son tomados mediante una aplicación móvil de pago (Torque Pro) en un smartphone con sistema operativo Android, el cual se conecta a una red IEEE-802.11 (WiFi) creada por el adaptador OBD2 que se comunica con la ECU (Electronic Control Unit) mediante el protocolo CAN Bus.

**Palabras Clave:** Celdas de Baterías. BMS. Voltaje. Corriente. SOC. NiMH. Li-ion. Módulo. OBD2. Ruta. Vehículo Híbrido. Toyota Prius. Motor IC. Motor Eléctrico. Vida Útil. Autonomía.





## Abstract

This experimental degree work details the design and implementation of a Li-ion battery bank as a replacement of the original NiMH (Nickel-Metal-Hydride) bank of a hybrid vehicle (Toyota Prius C). In this work performance analyses are carried out in different driving environments over which an ordinary vehicle can travel. Also, a comparison of budgets between the replacement with the original technology in an authorized importer of the vehicle brand against the costs that were made during the assembly process of the new Li-ion bank.

A study of the different families or types of Li-ion batteries in the current market and the selection process of the technology implemented for the new bank is detailed.

With the attaching objective of the new battery bank as accurately as possible to the original structure of the vehicle, all the processes and adaptations that were made are described so that the cells of the new bank do not suffer physical damage, which could compromise their useful life and performance.

The final efficiency obtained from the new battery bank is compared with the original bank through the estimated cycle life and the reported fuel savings, when the vehicle transits through 3 different routes (city downtown, interstate road and highway). During the vehicle's journey, data on speed, cell voltage, state of charge, total bank current, module temperatures, etc., are taken through a mobile payment application (Torque Pro) on a smartphone with Android operating system, which connects to an IEEE-802.11 (WiFi) network created by the OBD2 adapter that communicates with the vehicle's ECU (Electronic Control Unit) through the CAN Bus protocol.

**Keywords:** Battery Cells. BMS. Voltage. Current. SOC. NiMH. Li-ion. Module. OBD2. Road. Hybrid Vehicle. Toyota Prius. IC Motor. Electric Motor. Cicle Life. Autonomy.





# Índice de general

ÍNDICE DE FIGURAS .....	12
ÍNDICE DE TABLAS .....	17
DEDICATORIA .....	24
DEDICATORIA .....	26
AGRADECIMIENTOS .....	28
AGRADECIMIENTOS .....	30
ABREVIACIONES Y ACRÓNIMOS.....	31
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>36</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	36
1.2 ANTECEDENTES.....	37
1.3 ALCANCE.....	37
1.4 OBJETIVOS .....	37
1.4.1 Objetivo general.....	37
1.4.2 Objetivos Específicos .....	38
1.5 METODOLOGÍA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.....	38
<b>CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>39</b>
2.1 TECNOLOGÍA VEHICULAR.....	39
2.1.1 Vehículo convencional con Motor a combustión interna (ICE).....	39
2.1.2 Tecnología Vehicular Eléctrica (EVT). .....	40
2.1.2.1 Vehículo Eléctrico (EV).....	40
2.1.2.2 Vehículo eléctrico híbrido (HEV) .....	41
2.1.2.2.1 Vehículo eléctrico híbrido en serie .....	42
2.1.2.2.2 Vehículo eléctrico híbrido en paralelo .....	42
2.1.2.2.3 Vehículo eléctrico híbrido serie-paralelo.....	43
2.1.2.3 Vehículo eléctrico de celda de combustible (FCEV).....	43
2.1.3 Comparación por eficiencia de vehículos convencionales, eléctricos e híbridos. ....	44
2.2 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS .....	45
2.2.1 Parámetros de las baterías.....	46
2.2.1.1 Índice de capacidad.....	46
2.2.1.2 Estado de carga (SOC) .....	47
2.2.1.3 Profundidad de descarga (DOD) .....	47
2.2.1.4 Voltaje nominal de celda.....	47
2.2.1.5 Energía Especifica y Densidad de Energía.....	48
2.2.1.6 Eficiencia Energética.....	48
2.2.1.7 Ciclo de Vida .....	49



2.2.1.8	Potencia Especifica y Densidad de Potencia.....	49
2.2.1.9	Autodescarga.....	49
2.2.1.10	Temperatura de Operación .....	49
2.2.2	Tipos baterías. ....	51
2.2.2.1	Baterías de Plomo Acido .....	51
2.2.2.2	Baterías a base de Níquel.....	52
2.2.2.2.1	Baterías de NiCd.....	53
2.2.2.2.2	Baterías de NiMH .....	53
2.2.2.3	Baterías de iones de Litio .....	54
2.2.2.3.1	Oxido de litio y cobalto ( <b>LiCoO2</b> ) LCO .....	55
2.2.2.3.2	Oxido de litio y manganeso ( <b>LiMn2O4</b> ) LMO.....	56
2.2.2.3.3	Óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto ( <b>LiNiMnCoO2</b> ) - NMC .....	56
2.2.2.3.4	Fosfato de litio y hierro ( <b>LiFePO4</b> ) – LFP .....	57
2.2.2.3.5	Oxido de litio, níquel, cobalto y aluminio ( <b>LiNiCoAlO2</b> ) - NCA.....	59
2.2.2.3.6	Titanato de litio ( <b>Li2TiO3</b> ) – LTO .....	59
2.2.3	Comparación de tecnologías.....	60
2.2.4	Tipos de estimación del SOC.....	61
2.2.4.1	Tablas de Búsqueda.....	61
2.2.4.2	Método Integral de Amperios-Hora .....	62
2.2.4.3	Método de estimación basado en datos.....	63
2.2.4.4	Métodos de estimación basado en modelos .....	64
2.3	SISTEMAS DE GESTIÓN DE BATERÍAS (BMS) .....	65
2.3.1	Definición de BMS .....	65
2.3.2	Funcionamiento del BMS .....	65
2.3.2.1	Módulo de adquisición de parámetros de batería .....	66
2.3.2.2	Módulo de Balanceo del Sistema de Baterías .....	67
2.3.2.2.1	Circuitos de Balanceo Pasivos.....	68
2.3.2.2.2	Circuitos de Balanceo Activos .....	69
2.3.2.3	Modulo de gestión de información de la Batería.....	71
2.3.2.4	Módulo de gestión térmica (BTM) .....	72
2.3.2.5	Módulo de control de carga de la batería .....	73
2.4	FACTORES QUE AFECTAN LA VIDA ÚTIL DE LAS BATERÍAS .....	75
2.4.1	Influencia de la temperatura.....	75
2.4.1.1	Degradación del rendimiento .....	76
2.4.1.2	Fuga Térmica.....	77
2.4.1.3	Mala distribución de la temperatura .....	78
2.4.1.4	Comportamiento a bajas temperaturas.....	79
2.4.2	Descarga profunda .....	79
2.4.3	Envejecimiento.....	82
2.4.3.1	Efectos del envejecimiento en el electrodo negativo .....	82
2.4.3.2	Efectos del envejecimiento en el electrodo positivo .....	83
2.4.3.3	Consecuencias del fenómeno de envejecimiento .....	83





2.4.3.4 Orígenes del envejecimiento .....	83
2.4.3.5 Estimación del envejecimiento .....	84
<b>CAPÍTULO 3: COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO VEHÍCULO HÍBRIDO EN ESTUDIO.....</b>	<b>86</b>
3.1 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ORIGINAL (TOYOTA PRIUS C).....	86
3.2 PROCEDIMIENTO DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	89
3.2.1 Sistema de diagnóstico a bordo (OBD) .....	89
3.2.2 Puerto de Comunicación.....	90
3.2.3 Protocolos de comunicación del estándar OBD2 .....	90
3.2.3.1 SAE J1850 Variable Pulse Width.....	91
3.2.3.2 SAE J1850 Pulse Width Modulation .....	92
3.2.3.3 ISO 9141-2 .....	92
3.2.3.4 ISO 14230 Keyword Protocol (KWP) 2000 .....	92
3.2.3.5 ISO 15765-4/SAE J2480 Controller Area Network (CAN) .....	93
3.2.4 Escenario práctico para la adquisición de datos .....	97
3.2.4.1 Aplicación móvil para adquisición de datos.....	98
3.2.4.2 Representación de datos obtenidos .....	99
3.3 COMPORTAMIENTO EN RUTAS TÍPICAS, DESCARGA Y CARGA DE LAS BATERÍAS Y ESTIMACIÓN DE SU CICLO DE VIDA .....	99
3.3.1 Pruebas en una ruta en autopista.....	100
3.3.2 Pruebas en una ruta urbana. ....	103
3.3.3 Pruebas en una ruta en carretera .....	107
3.3.3.1 Ruta de ida (subida).....	108
3.3.3.2 Ruta de vuelta (bajada).....	111
3.3.4 Estimación del ciclo de vida .....	113
3.3.5 Condiciones típicas de operación, máximo y mínimo voltaje, corriente, y SOC .....	116
3.3.6 Identificación del error de la ECU .....	118
<b>CAPÍTULO 4: DISEÑO Y DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>123</b>
4.1 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DISPONIBLES .....	123
4.1.1 Elección de la nueva tecnología .....	124
4.1.2 Dimensionamiento del nuevo banco de baterías .....	124
4.2 DISEÑO DEL BANCO DE BATERÍAS NUEVO .....	126
4.2.1 Proceso constructivo y montaje del banco nuevo .....	131
4.3 ANÁLISIS ECONÓMICO .....	135
4.3.1 Costo de batería original.....	136
4.3.2 Costo de ensamblaje a partir de polímero Li-ion del tipo LFP. ....	136
4.4 PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	137
4.4.1 Comportamiento en carga y descarga del nuevo sistema de almacenamiento.....	137
4.4.1.1 Ruta en autopista .....	137
4.4.1.2 Ruta en el centro urbano .....	142



4.4.1.3 Ruta en carretera.....	146
4.4.1.4 Condiciones típicas de operación para el nuevo banco de baterías.....	152
4.4.2 Estimación de vida útil.....	153
4.4.3 Consumo de combustible.....	156
4.4.3.1 Comparación mediante tablero del vehículo.....	156
4.4.3.2 Comparación mediante registros tomados con el OBD2.....	158
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....</b>	<b>163</b>
5.1 CONCLUSIONES.....	163
5.2 TRABAJOS FUTUROS.....	165
<b>ANEXO A ANÁLISIS ECONÓMICO.....</b>	<b>167</b>
A.1 Costo de batería original.....	168
A.2 Costo de ensamblaje a partir de polímero Li-ion del tipo LFP.....	169
<b>ANEXO B MEDICIONES ADICIONALES DEL NUEVO BANCO DE BATERÍAS.....</b>	<b>171</b>
B.1 Medición de resistencia interna de celdas.....	171
B.2 Medición de resistencia interna de módulos.....	174
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>176</b>





## Índice de figuras

Figura 2.1 Arquitectura de vehículo convencional ICE	39
Figura 2.2 Arquitectura de vehículo Eléctrico.	41
Figura 2.3 Arquitectura de vehículo híbrido en serie.	42
Figura 2.4 Arquitectura de vehículo híbrido en paralelo.	43
Figura 2.5 Arquitectura de vehículo híbrido serie-paralelo.	43
Figura 2.6 Arquitectura de vehículo de celda de combustible.	44
Figura 2.7 Arquitecturas de batería con varios conceptos de conectividad de celdas	45
Figura 2.8 Curvas representativas de descarga para una celda de 33.3 Ah de Li-ion [16]	48
Figura 2.9 Perfiles de descarga de una celda de Li-ion de 2.8Ah a 3A y varias temperaturas [18].	50
Figura 2.10 Esquema de una batería de plomo ácido	51
Figura 2.11 Carga y descarga de una batería de Li-ion	54
Figura 2.12 Relación entre el voltaje en circuito abierto (OCV) y el estado de carga (SOC) en una batería de iones de Litio [17]	62
Figura 2.13 Sistema LTI para los métodos de estimación basado en datos experimentales.	63
Figura 2.14 Métodos de estimación de SOC basados en modelos [17]	64
Figura 2.15 Diagrama general de un BMS	65
Figura 2.16 Circuito discreto de conversión AD multicanal para el muestreo de la tensión de un sistema de baterías	66
Figura 2.17 Medición del voltaje de celda usando el integrado LTC6803-3 [17]	67
Figura 2.18 Resistencia de derivación fija	68
Figura 2.19 Circuito de balanceo de baterías pasivo con resistores de conmutación en derivación	69
Figura 2.20 Circuitos de Balanceo de carga basados en capacitor	70
Figura 2.21 Circuito de balanceo de carga basado en transformador de un solo bobinado	70
Figura 2.22 Circuito de balanceo de carga basado en transformador de bobinado primario común	71
Figura 2.23 Fases de carga en una batería según el estándar IUoU (DIN 41773) [43]	73
Figura 2.24 Perfil de carga típico en celdas de Li-ion [44]	74
Figura 2.25 Efecto de la temperatura para tasas 1C/-1C, a ciclos de 100% DOD para celdas prismáticas de Li-ion de 20Ah [49].	77
Figura 2.26 Curva de voltaje en descarga profunda	80
Figura 2.27 Degradación de la capacidad después de 10 ciclos de descarga profunda	81
Figura 3.1 Celda original de NiMH del Toyota Prius C	87
Figura 3.2 Arquitectura del sistema de energía del Toyota Prius C [57]	88
Figura 3.3 Elementos de la batería en el vehículo híbrido [58]	89
Figura 3.4 Conector de diagnóstico OBD-II y su distribución de pines dependiente del protocolo	91
Figura 3.5 Pines del OBD para el protocolo VPW	91
Figura 3.6 Pines del OBD para el protocolo PWM	92
Figura 3.7 Pines del OBD para el protocolo ISO9141-2	92
Figura 3.8 Pines del OBD para el protocolo ISO15765 CAN	94



Figura 3.9 Arquitectura del protocolo de comunicación CAN.	94
Figura 3.10 Estados del bus dominante y recesivo del protocolo CAN	95
Figura 3.11 Trafico del bus CAN	96
Figura 3.12 Prueba del Bus CAN	96
Figura 3.13 Conector de Diagnostico OBD2 (Wsiiron Car WiFi OBD2) usado en las mediciones	97
Figura 3.14 Aplicación móvil Torque y algunas de las variables que permite monitorizar	98
Figura 3.15 Gráfica de voltaje del paquete versus el estado de carga para una prueba en una ruta aleatoria	99
Figura 3.16 Recorrido realizado para la ruta en autopista	101
Figura 3.17 Datos de corriente y SOC tomados en la ruta de autopista	101
Figura 3.18 Relación entre capacidad (Ah) y SOC del banco de baterías en la ruta en autopista	102
Figura 3.19 Datos de voltaje y SOC tomados en la ruta de autopista	102
Figura 3.20 Datos de velocidad y SOC tomados en la ruta de autopista	103
Figura 3.21 Recorrido realizado para la ruta en el centro urbano	104
Figura 3.22 Datos de corriente del paquete de baterías y velocidad del vehículo tomados en un ambiente urbano	104
Figura 3.23 Datos de corriente del paquete de baterías y SOC tomados en un ambiente urbano	105
Figura 3.24 Relación entre Capacidad y SOC del banco de baterías para la ruta urbana	105
Figura 3.25 Datos de voltaje del paquete de baterías y SOC tomados en un ambiente urbano	106
Figura 3.26 Datos de SOC y velocidad tomados en un ambiente urbano	106
Figura 3.27 Perfil de altura del trayecto seguido para la ruta en el ambiente urbano.	107
Figura 3.28 Recorrido realizado para la ruta en carretera	107
Figura 3.29 Perfil de altura del recorrido	108
Figura 3.30 Datos de voltaje total y SOC tomados de la ruta en carretera (tramo de ida)	109
Figura 3.31 Datos de corriente total y SOC tomados de la ruta en carretera (tramo de ida)	110
Figura 3.32 Datos de velocidad y SOC tomados de la ruta en carretera (tramo de ida)	111
Figura 3.33 Datos de corriente total y SOC tomados de la ruta en carretera(bajada)	112
Figura 3.34 Datos de voltaje total y SOC tomados de la ruta en carretera(bajada)	112
Figura 3.35 Datos de velocidad y SOC tomados de la ruta en carretera(bajada)	113
Figura 3.36 Variación de la Potencia en la ruta urbana	114
Figura 3.37 (a) Potencia durante la descarga en la ruta urbana (b) Potencia durante la carga en la ruta urbana	114
Figura 3.38 Alerta de error en el tablero del vehículo	118
Figura 3.39 Código de error obtenido mediante OBD2	118
Figura 3.40 Prueba 1 - Voltaje Total vs Estado de Carga	119
Figura 3.41 Prueba 1 - Diferencia entre mínimo y máximo vs Estado de Carga	119
Figura 3.42 Prueba 1 - Voltaje de los módulos vs Estado de Carga	120
Figura 3.43 (a) Voltaje vs Estado de Carga - Prueba 2 (b) Diferencia entre mínimo y máximo vs Estado de Carga – Prueba 2	120
Figura 3.44 Prueba 2 - Voltaje de los módulos vs Estado de Carga	121
Figura 3.45 (a) Voltaje vs Estado de Carga - Prueba 3 (b) Diferencia entre mínimo y máximo vs Estado de Carga – Prueba 3	121



Figura 3.46 Prueba 3 - Voltaje de los módulos vs Estado de Carga	122
Figura 4.1 Celda de bolsa metálica Li-ion LFP, usada para la creación del nuevo banco de baterías	128
Figura 4.2 Diseño de la configuración en serie para el nuevo banco de baterías	130
Figura 4.3 Estructura de conexionado de la BMS en el nuevo bloque de baterías	130
Figura 4.4 Estructura para la unión de dos celdas en serie	131
Figura 4.5 Asilamiento entre las uniones de celdas vecinas mediante tubo de caucho	131
Figura 4.6 Todos los módulos de 5 baterías en serie usadas para armar el nuevo banco	132
Figura 4.7 Banco de baterías con todos los módulos interconectados, junto con el cable modificado de la BMS y el cable para la conexión del fusible	133
Figura 4.8 Fusible o puente de conexión para el banco de baterías	133
Figura 4.9 Terminal de lectura de la BMS o sensor de voltaje	134
Figura 4.10 Caja de relés de potencia del banco de baterías original	134
Figura 4.11 Banco de baterías nuevo junto con todos los componentes	135
Figura 4.12 Nuevo banco de baterías montado sobre la estructura original y debajo del asiento trasero	135
Figura 4.13 Recorrido realizado para la ruta en autopista con el nuevo banco de baterías	138
Figura 4.14 Datos de corriente total y SOC tomados de la ruta en autopista con el nuevo banco de baterías	138
Figura 4.15 Relación entre Capacidad y SOC para la ruta en autopista del nuevo banco de baterías.	139
Figura 4.16 Proceso de carga y descarga del nuevo banco de baterías en la ruta en autopista	140
Figura 4.17 (a) Velocidad y corriente para la ruta en autopista (b) Velocidad y ICE RPM para la ruta en autopista	141
Figura 4.18 Voltajes de los 10 módulos y el estado de carga para la ruta de autopista con el nuevo banco de baterías	142
Figura 4.19 Recorrido de la ruta en el centro urbano con el nuevo banco de baterías	143
Figura 4.20 Variación del estado de carga en la ruta por el centro urbano con el nuevo banco de baterías	143
Figura 4.21 Corriente y SOC para la ruta en el centro urbano con el nuevo banco de baterías	144
Figura 4.22 Relación entre Capacidad y SOC para la ruta en el centro urbano del nuevo banco de baterías.	144
Figura 4.23 Datos de Velocidad y SOC para la ruta en el centro urbano con el nuevo banco de baterías	145
Figura 4.24 Niveles de voltaje de los 10 módulos del nuevo banco de baterías y SOC para la ruta en el centro urbano	145
Figura 4.25 Recorrido de la ruta en carretera realizado con el nuevo banco de baterías	146
Figura 4.26 Variación del SOC para la ruta en carretera con el nuevo banco de baterías-trayecto de ida	147
Figura 4.27 Variación del SOC para la ruta en carretera con el nuevo banco de baterías-trayecto de retorno	147
Figura 4.28 Datos de corriente y SOC tomados de la ruta de carretera(ida) con el nuevo banco de baterías	148
Figura 4.29 Datos de corriente y SOC tomados de la ruta de carretera(retorno) con el nuevo banco de baterías	148



Figura 4.30 Relación entre la capacidad y el SOC para la ruta en carretera con el nuevo banco de baterías (a) ida (b) vuelta	149
Figura 4.31 Voltaje de los 10 módulos y SOC para la ruta de carretera(retorno) con el nuevo banco de baterías	150
Figura 4.32 Ecuación de los módulos cuando el nivel de SOC alcanza el máximo (80%)	151
Figura 4.33 Máximo nivel de SOC alcanzado en la ruta de retorno	151
Figura 4.34 Autonomía con batería original	157
Figura 4.35 Autonomía con batería nueva	157
Figura 4.36 Autonomía de batería nueva y batería original	158
Figura 4.37 Rutas en un entorno urbano (a) Batería original (b) Batería nueva	159
Figura 4.38 Consumo de combustible y distancia recorrida- ruta urbana	159
Figura 4.39 Consumo de combustible y distancia recorrida - carretera	160
Figura 4.40 Consumo de combustible en diferentes entornos	161
Figura 4.41 Autonomía del vehículo en diferentes entornos	162
Figura A.1 Cotización de batería original	168
Figura B.1 Fluke BT521 Advanced Battery Analyzer	171







## Índice de tablas

Tabla 2.1 Comparación por eficiencia de vehículos	44
Tabla 2.2 Especificaciones de una celda de batería de LCO	55
Tabla 2.3 Especificaciones de una celda de batería de LMO	56
Tabla 2.4 Especificaciones de una celda de batería de NMC	57
Tabla 2.5 Especificaciones de una celda de batería de LFP 20Ah	58
Tabla 2.6 Especificaciones de una celda de batería de LFP	58
Tabla 2.7 Especificaciones de una celda de batería de NCA	59
Tabla 2.8 Especificaciones de una celda de batería de LTO	60
Tabla 2.9 Comparación de tecnologías de baterías	61
Tabla 2.10 Capacidad antes y después de 10 ciclos de descarga profunda	81
Tabla 3.1 Sistema de almacenamiento de energía del Toyota Prius C	86
Tabla 3.2 Velocidad del protocolo CAN con respecto a la distancia	93
Tabla 3.3 Extracto de los datos obtenidos para la ruta en carretera	109
Tabla 3.4 Resultados de energía consumida y almacenada por el vehículo en las 3 rutas bajo análisis	115
Tabla 3.5 Vida útil en diferentes entornos	116
Tabla 3.6 Rangos de operación típicos de voltaje, corriente y SOC obtenidos de las rutas bajo análisis.	117
Tabla 4.1 Sistemas de almacenamiento disponibles en el mercado	125
Tabla 4.2 Especificaciones de la celda de Li-ion LFP para el armado del nuevo bloque	126
Tabla 4.3 Características del nuevo banco de baterías hecho a base de celdas de Li-ion LFP	128
Tabla 4.4 Costo total del banco de baterías de Li-ion	136
Tabla 4.5 Rangos típicos de operación del nuevo banco de baterías para las 3 rutas bajo análisis	152
Tabla 4.6 Desviación estándar del SOC para las 3 rutas bajo análisis	152
Tabla 4.7 Consumo energético del nuevo banco de baterías en las 3 rutas bajo análisis	153
Tabla 4.8 Vida útil del nuevo banco de baterías en los 3 entornos bajo análisis	154
Tabla 4.9 Comparación de vida útil entre batería original y baterías de Li-ion	154
Tabla 4.10 Consumo de combustible en diferentes entornos	160
Tabla 4.11 Eficiencia de combustible – Batería original nueva	161
Tabla A.1 Costos de Importación	169
Tabla A.2 Costos de construcción	170
Tabla B.1 Registro de resistencia interna y voltaje nominal de todas las celdas para el nuevo banco de baterías	172
Tabla B.2 Registro de resistencia y voltaje en DC para todos los módulos del nuevo banco de baterías	174





### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Yo, Edgar Marcelo Bustamante Verdugo, autor del trabajo de titulación "Estudio de factibilidad técnico-económica del diseño e implementación de un banco de baterías para un vehículo híbrido", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 28 de agosto de 2020.

---

Edgar Marcelo Bustamante Verdugo

C.I: 0301894267



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Yo, Gilson Xavier Reibán Morocho, autor del trabajo de titulación "Estudio de factibilidad técnico-económica del diseño e implementación de un banco de baterías para un vehículo híbrido", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 28 de agosto de 2020.

---

Gilson Xavier Reibán Morocho

C.I: 0105175038



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Yo, Edgar Marcelo Bustamante Verdugo en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estudio de factibilidad técnico-económica del diseño e implementación de un banco de baterías para un vehículo híbrido", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 28 de agosto de 2020.

---

Edgar Marcelo Bustamante Verdugo

C.I: 0301894267



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Yo, Gilson Xavier Reibán Morocho en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estudio de factibilidad técnico-económica del diseño e implementación de un banco de baterías para un vehículo híbrido", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 28 de agosto de 2020.

Gilson Xavier Reibán Morocho

C.I: 0105175038





## Dedicatoria

**A mis padres y mi hermana** por el sacrificio realizado y el apoyo incondicional brindado a lo largo de la carrera Universitaria y ser una inspiración que me permitió avanzar durante todas y cada una de las etapas y momentos difíciles que se superaron con éxito.

**A todos mis familiares** que depositaron su confianza y apoyo con palabras de aliento en los momentos que los necesitaba.

A todos mis amigos que me brindaron su amistad, muestras de compañerismo y valiosa compañía durante toda la etapa Universitaria.

**Edgar Bustamante V.**







## Dedicatoria

**A mis padres** por su amor, consejos, y apoyo que me brindaron para seguir adelante con mis propósitos, guiándome por el camino correcto durante toda mi vida para convertirme en la persona que soy hoy.

**A mis hermanas** por estar siempre presentes, brindarme su apoyo y ser una inspiración para seguir adelante.

**A Karolyne** por brindarme su amor y compañía a lo largo de mi carrera universitaria, gracias por ser mi motivación.

**A mis amigos y compañeros**, por siempre estar allí, en los buenos y malos momentos.

**Xavier Reibán M.**





## Agradecimientos

**Al Ing. Luis González**, nuestro director de tesis, por los consejos, paciencia, experiencia compartida, palabras de aliento y grandes horas de dedicación brindados desde el primer día, que nos permitió culminar con éxito este trabajo de titulación.

**A mis padres y mi hermana**, gracias por ayudarme a alcanzar este logro tan importante.

**A la Universidad de Cuenca**, específicamente a los docentes de la Escuela de Electrónica y Telecomunicaciones, que durante todos estos años de aprendizaje nos impartieron valiosas enseñanzas, experiencias y conocimientos, que nos servirán mucho en nuestra vida profesional.

**A todas las amistades** formadas a lo largo de la etapa universitaria, gracias por los buenos momentos compartidos y las experiencias vividas.

**Edgar Bustamante V.**





## Agradecimientos

**A mis padres** por su apoyo moral y brindarme los recursos necesarios para poder alcanzar esta meta en mi vida.

**Al Ing. Luis González** por habernos brindado su apoyo y compartirnos su conocimiento. Así como también por la paciencia y enseñanzas a lo largo del desarrollo de la tesis.

**A todas las personas**, que ayudaron directa e indirectamente a la realización de este proyecto.

**Xavier Reiban M.**



## Abreviaciones y Acrónimos

### **A**

#### ACK

Acknowledgement (Acuse de recibo)., 93

#### AD

Analog to Digital (Analógico a Digital), 66

#### Ah

Amperios-hora., 38, 47, 52, 57, 58, 59, 61, 62, 64, 77, 80, 86, 101, 102, 105, 109, 126, 128, 163

#### AWG

American Wire Gauge (Calibre de alambre estadounidense)., 132, 170

### **B**

#### BCU

Battery control unit (Unidad de control de la batería)., 71

#### BMS

Battery Management System (Sistema de gestión de baterías)., 3, 5, 46, 65, 67, 71, 73, 76, 78, 108, 110, 112, 118, 129, 130, 132, 133, 134, 138, 141, 146, 156, 165

#### BTM

Battery Thermal Management (Módulo de gestión térmica)., 72

### **C**

#### CA

Corriente Alterna, 39

#### CAN

Controller Area Network (Protocolo de comunicaciones CAN bus), 3, 5, 71, 72, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 180

#### CC

Corriente Continua, 39, 43, 47, 87

#### CI

Circuito Integrado., 67

#### CSMA/CD+CR

Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection + Collision Resolution., 96

#### CSMA/CR

Carrier sense multiple access-collision resolution, 91, 92

#### CSV

Comma-separated-values (Archivo de valores separados por comas), 97

#### CVT

Continuously variable transmission (Sistema de transmisión variable-continua)., 42



## **D**

### DOD

Depth of discharge (Profundidad de descarga)., 46, 48, 52, 76, 77, 80, 81, 125, 127

### DTC

Diagnostic Trouble Code (Código de Diagnóstico de problemas)., 89, 90, 97

## **E**

### ECU

Engine control unit (Unidad de control del motor), 3, 5, 88, 89, 90, 92, 93, 101, 109, 110, 111, 118, 134, 139, 149, 180

### EOL

End of Life (Fin del ciclo de vida de una batería), 84, 85

### EV

Electric Vehicle (vehículo eléctrico)., 36, 39, 40, 44, 47, 50, 52, 55, 58, 59, 60, 62, 64, 67, 69, 71, 73, 90, 124, 125, 163, 180

### EVT

Electric vehicle technology (Tecnología vehicular eléctrica)., 39

## **F**

### FCEV

Fuel cell electric vehicle (vehículo eléctrico de celda de combustible)., 43, 44

### FCV

Fuel cell vehicle (vehículo con celdas de combustible)., 39

## **G**

### GPS

Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global), 98

## **H**

### HEV

Hybrid electric vehicle (vehículo eléctrico híbrido), 36, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 46, 50, 51, 52, 53, 58, 72, 90, 125, 126, 163, 164, 178, 180

## **I**

### IC

Internal Combustion (Combustión Interna), 3, 5, 41, 43, 67, 101, 108, 111, 123, 124, 125, 140, 146, 155, 163, 164

### ICE

Internal Combustion Engine (Motor de combustión interna)., 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 50, 125, 141

### INARPI

Terminal Portuario de Guayaquil., 136





## **K**

Kbps

kilobits por segundo, 92, 93, 94

kg

Kilogramos, 48, 49, 51, 52, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 123, 127

kW

Kilowatt hour(Kilovatio-hora)., 36

KWP

Keyword Protocol, 90, 92

## **L**

LCO

Lithium-cobalt-oxide (óxido de litio-cobalto), 55, 123

LFP

Lithium-iron-phosphate (Litio-ferrofosfato)., 57, 58, 123, 124, 126, 128, 135, 136, 152, 165, 169

Li-ion

Ion de Litio, 3, 5, 36, 47, 49, 50, 53, 54, 60, 74, 76, 77, 123, 124, 125, 126, 128, 135, 136, 152, 155, 156, 160, 163, 164, 165, 169, 177, 179

LiPo

Lithium-Polymer (Litio-polímero)., 54

LMO

Lithium-manganese-oxide (Óxido de litio-manganeso)., 55, 56, 123

LTO

Lithium-titanate (Titanato de Litio), 59, 60, 123, 124

## **M**

Mbps

Megabits por segundo, 93

## **N**

NCA

Lithium-nickel-cobalt-aluminium oxide (Óxido de litio-níquel-cobalto-aluminio), 59, 123

Lithium-nickel-cobalt-aluminium oxide (Óxido de litio-níquel-cobalto-aluminio), 59

NiCd

Nickel-Cadmium (Níquel-Cadmio), 48, 49, 50, 52, 53, 60

NiFe

Nickel-iron (Níquel-hierro)., 52

NiMH

Nickel-metal hydride (Hidruro de níquel-metal), 3, 5, 36, 37, 38, 48, 50, 52, 53, 60, 86, 87, 123, 124, 142, 164

NiZn

Nickel-Zinc(Níquel-Zinc), 52



**NMC**

Nickel-manganese-cobalt oxide (Óxido de níquel-manganeso-cobalto), 55, 56, 57, 59, 124

**NN**

Neural Network (Red Neuronal)., 63

**O**

**OBD**

On board diagnostics (Sistema de diagnóstico a bordo)., 89, 90, 91, 92, 94, 180

**OBD2**

On Board Diagnostics (Sistema de diagnóstico a bordo)., 3, 5, 37, 38, 90, 92, 97, 98, 118, 137, 138, 158, 180

**OCV**

Open circuit voltage (voltaje en circuito abierto)., 61, 62, 64

**P**

**PHEV**

Plug-in hybrid electric vehicle (vehículo eléctrico híbrido enchufable), 36, 39, 44, 50, 126

**PSOC**

Partial state of charge (Estado de carga parcial)., 51

**PWM**

Pulse width modulation (Modulación por ancho de pulso)., 91, 92, 97

**R**

**RPM**

Revoluciones por minuto., 97, 141, 155

**RS232**

Recommended Standard 232 (Estándar Recomendado 232), 92

**S**

**SEI**

Solid Electrolyte Interphase (Interface Electrolítica Sólida)., 77, 82, 83

**SOC**

State of charge (Estado de carga)., 3, 5, 38, 46, 47, 51, 52, 60, 61, 62, 63, 64, 71, 73, 74, 75, 82, 83, 84, 90, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 117, 119, 125, 126, 127, 129, 137, 138, 139, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 179

**SOH**

State of Health (Estado de salud de una batería), 71, 84, 85

**U**

**UPS**

Uninterruptible power supply (Sistema de alimentación ininterrumpida=., 58, 60, 177



## **V**

### VCU

Vehicle control unit (Unidad de control del vehículo), 71

### VPW

Variable Pulse Width (Ancho de pulso variable), 91, 97

## **W**

### Wh/kg

Vatios-hora por kilogramo (Energía Específica), 48

### Wh/L

Vatios-hora por litro (Densidad de energía volumétrica), 48, 55, 127

### WiFi

Wireless Fidelity (Fidelidad Inalámbrica), 3, 5, 97



# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Introducción

En los vehículos convencionales, los productos derivados del petróleo se utilizan para impulsar las ruedas a través de motores de combustión interna (ICE) como unidades de conversión de energía [1]. Sin embargo, los productos derivados del petróleo son exhaustivos y se estima que, a la tasa de consumo actual, los recursos mundiales actuales del petróleo se agotarán en los próximos 50 años [2]. El uso de productos derivados del petróleo principalmente en el transporte también ha generado una creciente preocupación por la contaminación ambiental y los cambios climáticos posteriores.

Dado este escenario, satisfacer la demanda mundial de energía para los sistemas de transporte actuales y futuros con el menor impacto en el medio ambiente es un desafío importante para el desarrollo. Para enfrentar este desafío, se están infundiendo nuevos conceptos e innovaciones para hacer que los sistemas de transporte sean más eficientes, confiables y seguros con emisiones reducidas o nulas a un costo asequible. La mayoría de estas innovaciones se basan en la electrificación de la tecnología vehicular convencional [3].

Los sistemas de propulsión basados en ICE (Motor de combustión interna) están siendo reemplazados por un sistema de propulsión eléctrica, ya sea parcial o total, para minimizar el consumo de combustible y la emisión del tubo de escape. La electrificación es la manera más viable para lograr un transporte limpio y eficiente que es crucial para el desarrollo sostenible. En un futuro próximo, los vehículos eléctricos (EV), incluidos los vehículos eléctricos híbridos (HEV), los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) dominarán el mercado de vehículos limpios [4][5].

Para 2020, se espera que más de la mitad de las ventas de vehículos nuevos sean probablemente modelos EV. La clave y la tecnología que permite este cambio revolucionario es la batería.

Las baterías EV son muy diferentes de las que se utilizan en los dispositivos electrónicos de consumo, como los ordenadores portátiles y los teléfonos móviles. Estas baterías deben ser capaces de manejar alta potencia (hasta 100 kW) y alta capacidad energética (hasta decenas de kWh) en un espacio y peso limitados y a un precio asequible. Se han realizado grandes esfuerzos de investigación e inversiones en las tecnologías de baterías avanzadas que son adecuadas para vehículos eléctricos en todo el mundo.



Las dos principales tecnologías de baterías que se utilizan actualmente en los vehículos eléctricos son el hidruro de níquel metal (NiMH) y el ion litio (Li-ion). Casi todos los HEVs disponibles en el mercado hoy en día utilizan baterías de NiMH debido a su tecnología madura.

Debido al potencial de obtener mayor energía específica y densidad de energía, se espera que la adopción de las baterías de iones de litio crezca rápidamente en los vehículos eléctricos, especialmente en los PHEV y EV. Debe tenerse en cuenta que existen varios tipos de baterías de iones de litio basadas en una química similar pero ciertamente diferente [6].

## 1.2 Antecedentes

Debido al avance tecnológico en el área automotriz y el incremento de vehículos híbridos en el Ecuador, es fundamental la presencia de un equipo especializado con las nuevas tecnologías para la verificación y reparación de vehículos híbridos. Uno de los principales problemas que afectan su funcionamiento suelen presentarse en la batería HV, el cual se produce cuando alguna de sus celdas se deteriora, la misma que genera una reacción en cadena que afecta su funcionamiento global disminuyendo así cada vez su capacidad de almacenamiento y por ende su autonomía. Los usuarios de los vehículos al presentarse este problema adquieren una batería nueva de reemplazo, lo cual representa una elevada inversión económica.

## 1.3 Alcance

El desarrollo del tema de titulación propone la suplantación de una batería compuesta por celdas de composición química níquel-metal hidruro (NiMH) localizada en un vehículo híbrido (Toyota Prius C), la cual presenta daños en sus celdas y por ende una disminución en su rendimiento y autonomía; por una nueva batería ensamblada a partir de celdas de diferente composición química que tenga una mayor densidad energética para así obtener mayor autonomía que la original.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Estudiar la factibilidad técnico-económica del reemplazo de un banco de baterías de un vehículo híbrido.



### 1.4.2 Objetivos Específicos

- I. Diagnosticar el estado de los componentes del banco de baterías original.
- II. Diseñar y construir una batería de reemplazo, para las celdas de níquel-metal hidruro (NiMH) por otra tecnología de almacenamiento.
- III. Cuantificar y analizar el comportamiento del nuevo banco de baterías.

### 1.5 Metodología del Trabajo Experimental

Para el reemplazo, inicialmente se realiza un diagnóstico de la batería por medio del protocolo OBD2. El OBD2 aporta un monitoreo completo de los sensores del vehículo con el fin de obtener datos como corriente de carga y descarga de la batería en funcionamiento, voltajes de cada celda cuando la batería está en estado de carga y descarga, esto nos permitirá categorizar a las celdas y especificar cuáles son las celdas que están deterioradas y producen el problema.

El vehículo híbrido en donde se pretende realizar todas las pruebas e implementaciones propuestas en la tesis será el modelo Toyota Prius C, cuya batería consiste en un bloque de baterías de 144 V de níquel-metal hidruro (NiMH) que consta de 20 módulos de 7.2 V, conectados en serie.

Al momento de seleccionar la tecnología adecuada para el vehículo se debe tener en cuenta algunas características. La más significativa es su capacidad, que se mide en amperios hora (Ah). Además, la energía almacenada (capacidad por voltaje promedio durante la descarga) se mide en vatios-hora (Wh) y debe calcularse cuidadosamente. El estado de carga (SOC) utilizable de la batería que se representa en porcentaje es igualmente importante ya que indica el estado actual de carga disponible en la batería [3].

Finalmente se realizarán las pruebas de funcionamiento y comparación con el estado anterior a la suplantación del banco de baterías, esto se realizará a través de las herramientas de medición como OBD2 y un análisis de las gráficas de voltaje y corriente de las celdas. Al final se podrá concluir si es factible la sustitución de diferentes tecnologías de almacenamiento o si la opción de acudir al concesionario automotriz sigue siendo la única solución a la problemática en el modelo de vehículo bajo prueba.

## Capítulo 2: Estado del Arte

### 2.1 Tecnología Vehicular

#### 2.1.1 Vehículo convencional con Motor a combustión interna (ICE)

En los vehículos convencionales con motor ICE, se utiliza principalmente combustibles fósiles derivados del petróleo (gasolina, diésel, GLP, etc) para impulsar las ruedas a través de sistemas mecánicos a partir de la combustión interna en sus motores [7].

El motor ICE se acopla mediante un embrague al eje de transmisión, que finalmente impulsa a las ruedas. La Figura 2.1, representa la arquitectura básica del vehículo ICE convencional. El porcentaje de eficiencia del motor puede variar desde valores muy bajos hasta un 30% para la gasolina y 40% para el Diesel. En términos generales una eficiencia total del vehículo de tanque a rueda puede oscilar en un valor cercano al  $\eta_{(T-R)}$  de 20%, este es representativa de un vehículo Diesel convencional, y 17% para un vehículo a gasolina. Estas eficiencias relativamente bajas del motor en el rango de velocidad se compensan con la alta densidad de energía del combustible, para el caso de gasolina y diésel, lo que permite una conducción cómoda y de largo alcance con un reabastecimiento rápido y fácil. Una eficiencia representativa para la producción, refinación y distribución del combustible fósil desde el pozo al tanque  $\eta_{(P-T)}$  es 84%. Por lo tanto, la eficiencia general de pozo a rueda  $\eta_{(P-R)}$  es el producto de dos eficiencias. Las eficiencias generales de pozo a rueda varían de 17% para diésel a 14% para gasolina [8].

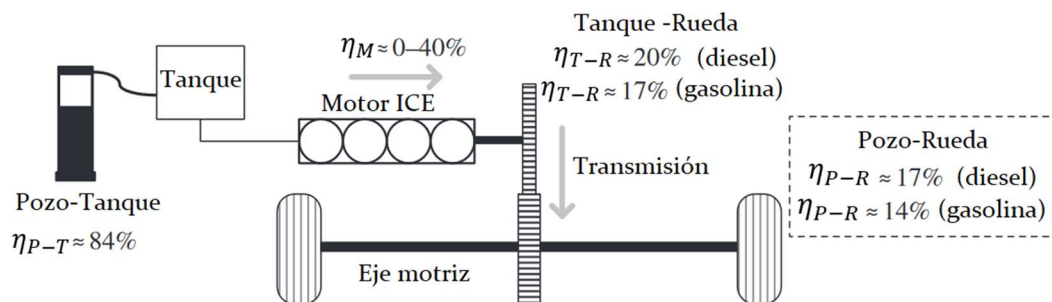


Figura 2.1 Arquitectura de vehículo convencional ICE



## 2.1.2 Tecnología Vehicular Eléctrica (EVT).

En EVT, los sistemas de propulsión basados en ICE están siendo reemplazados por un sistema de propulsión eléctrica, ya sea parcial o totalmente, para minimizar el consumo de combustible y la emisión de gases contaminantes por el tubo de escape. EVT implica la especialización en aspectos mecánicos, eléctricos, químicos y electrónicos para lograr una operación confiable de vehículos electrificados.

Los vehículos que emplean EVT pueden clasificarse en términos generales como: vehículos eléctricos (EV), vehículos eléctricos híbridos (HEV), vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) y vehículos con celdas de combustible (FCEV) [9].

### 2.1.2.1 Vehículo Eléctrico (EV)

El vehículo eléctrico transforma la energía química de la batería en energía mecánica mediante un accionamiento eléctrico, como se muestra en la Figura 2.2. El accionamiento eléctrico cuenta con un inversor, motor eléctrico y controles. El inversor convierte la CC en CA para alimentar de manera óptima el motor eléctrico. Si bien el EV es muy eficiente en la conversión energética, se puede presentar una limitante en el rango de autonomía del sistema de baterías, causada principalmente por una baja densidad de energía o energía específica (Wh/kg). Una eficiencia del tren motriz de la batería a la rueda  $\eta_{(B-R)}$  de aproximadamente el 80% es un número razonable para el EV. El vehículo se reabastece cargando la batería con energía de la red eléctrica. Una eficiencia de carga  $\eta_C$  del 85% es una estimación razonable de la eficiencia desde el enchufe a la batería. Por lo tanto, la eficiencia general de la red a rueda  $\eta_{(R-R)}$  es el producto de las dos eficiencias obteniendo aproximadamente un 68%.

Un EV con batería ofrece numerosas ventajas sobre vehículos basados en ICE, como emisión cero, alta eficiencia, independencia de los productos del petróleo, operación más segura, silenciosa y suave. Las desventajas significativas de los vehículos eléctricos incluyen un gran tiempo de carga de la batería, menor flexibilidad y rendimiento dinámico limitado. Una limitación importante de los vehículos eléctricos con batería es su rango de funcionamiento limitado por ciclo de carga de la batería [10].



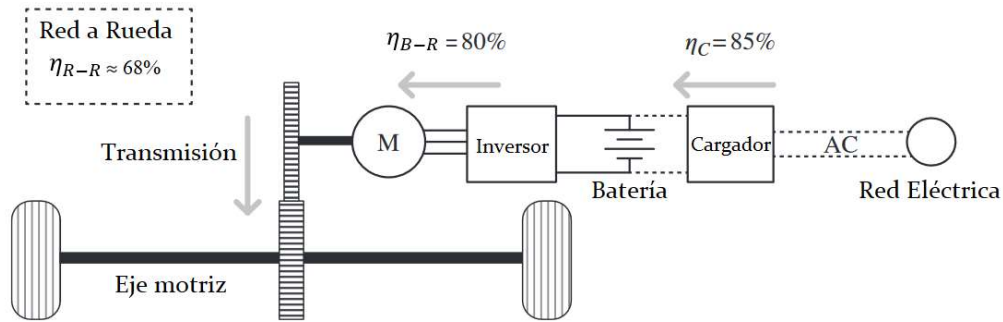


Figura 2.2 Arquitectura de vehículo Eléctrico.

### 2.1.2.2 Vehículo eléctrico híbrido (HEV)

El vehículo eléctrico híbrido (HEV) ofrece ventajas como un rango de operación eléctrico extendido, buena economía de combustible, mayor eficiencia, suficiente potencia a bordo y mejor respuesta dinámica. Sin embargo, la integración de la tecnología del automóvil con la tecnología eléctrica agrega complejidad en los controles y hace que el sistema de vehículos HEV sea relativamente voluminoso y costoso [11]. Los HEV mejoran la economía de combustible de los vehículos convencionales que funcionan con combustibles fósiles al abordar una serie de factores críticos que afectan la economía de combustible:

- 1) Se recupera la energía de frenado regenerativa y la capacidad de almacenarla en la batería. En un vehículo convencional, la energía de frenado se disipa en forma de calor por el sistema de frenado y se pierde en el vehículo.
- 2) El movimiento característico como paradas y arranques reiterados, bajas velocidades y bajos pares de torsión, presentes en ambientes de conducción como centros urbanos, generan una ineficiencia en un vehículo convencional, en cuanto al consumo de combustible. Por el contrario, un vehículo híbrido presenta un funcionamiento eficiente del motor, almacenando y utilizando la energía de la batería solo cuando es eficiente hacerlo, en otras palabras, se evita que el motor esté en funcionamiento consumiendo energía, cuando no se requiere movimiento o tracción alguna (este proceso es denominado ralentí del vehículo).
- 3) La vida útil de la batería puede extenderse y el costo de la batería puede reducirse debido a las descargas de baterías de poca profundidad en un sistema híbrido en comparación con un automóvil eléctrico con batería.

Hay diferentes sistemas híbridos, como son: serie, paralelo y serie paralelo, y estos se analizan a continuación.

### 2.1.2.2.1 Vehículo eléctrico híbrido en serie

El HEV en serie combina los mejores atributos del vehículo convencional ICE y el vehículo eléctrico. La arquitectura típica de un HEV se muestra en la Figura 2.3. Combina la alta densidad de energía del combustible del vehículo convencional ICE y la eficiencia del vehículo eléctrico. El HEV en serie hace funcionar el motor IC en un modo de alta eficiencia, el sistema de tracción eléctrica y el sistema ICE funcionan en una conexión en serie, el motor IC está acoplado con un generador de energía eléctrica y un convertidor para recargar la batería, la cual luego suministra energía a través de un inversor hacia el motor eléctrico, para luego el mismo suministrar energía mecánica al tren de transmisión [12]. Sin embargo, colocar dos accionamientos eléctricos en serie significa que el procesamiento de energía puede ser más ineficiente de lo deseado. La eficiencia para la etapa de generación eléctrica se estima en un 90%. Por lo tanto, la eficiencia general de pozo a rueda para el HEV en serie es de aproximadamente el 21%.

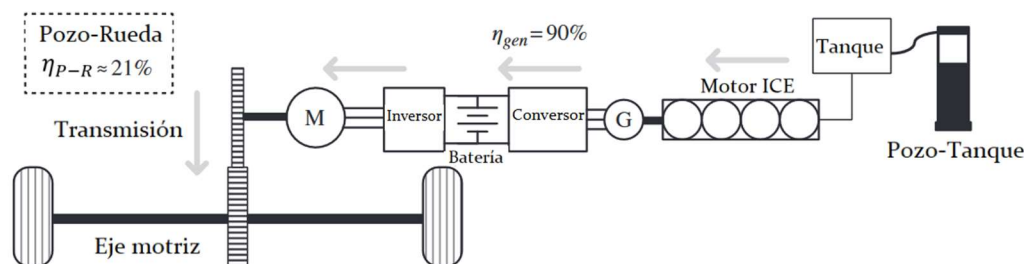


Figura 2.3 Arquitectura de vehículo híbrido en serie.

### 2.1.2.2.2 Vehículo eléctrico híbrido en paralelo

En el vehículo híbrido paralelo, el ICE y el motor eléctrico funcionan en modo paralelo, donde el ICE soporta la tracción eléctrica en ciertos puntos del patrón de conducción, por ejemplo, cuando se necesita una mayor potencia para las ruedas. La arquitectura paralela se ha implementado utilizando una transmisión de doble embrague. El motor ICE o el motor eléctrico se pueden acoplar directamente al eje de transmisión, y el ICE se puede acoplar al motor eléctrico para recargar la batería. Una arquitectura simple se muestra en la Figura 2.4. Si el vehículo está operando solo con el motor, entonces la eficiencia del motor puede ser alta si el motor funciona con eficiencia máxima. La eficiencia general puede disminuir a medida que la energía pasa por el sistema eléctrico debido a las ineficiencias en cada dirección a medida que la batería se carga y descarga, similar a la serie híbrida. La eficiencia del tren motriz a la rueda se supone que es alrededor del 80%. Por lo tanto, la eficiencia general de pozo a rueda para el HEV paralelo es de aproximadamente 24%.

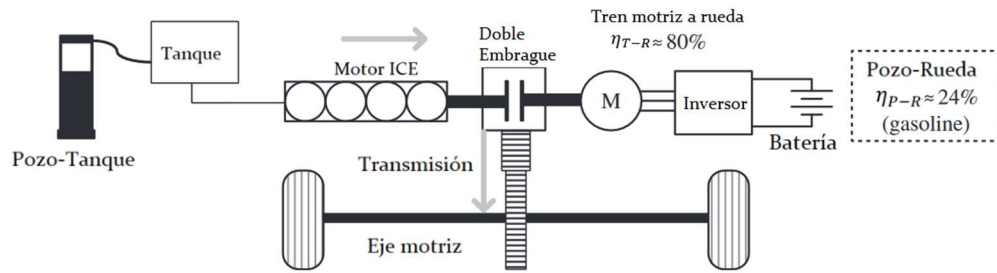


Figura 2.4 Arquitectura de vehículo híbrido en paralelo.

### 2.1.2.2.3 Vehículo eléctrico híbrido serie-paralelo

En el vehículo híbrido serie-paralelo, el sistema está diseñado para operar tanto en serie como en configuración paralela, la arquitectura se muestra en la Figura 2.5. El sistema reconfigurable se hace posible mediante un engranaje planetario y solar, conocido como CVT, para dividir la potencia del motor de modo que el vehículo pueda controlarse de manera óptima para dirigir la salida del motor al tren de transmisión para la propulsión directa del vehículo o a la batería para el accionamiento eléctrico. Esto reduce la ineficiencia introducida en el HEV en serie al tener las dos etapas eléctricas en serie. El HEV serie-paralelo también tiene dos etapas en serie, pero solo necesita hacerlo cuando es ineficiente conducir directamente desde el motor IC, similar al híbrido paralelo. La eficiencia representativa del pozo a la rueda es la misma que en el HEV paralelo y es de aproximadamente el 24%.

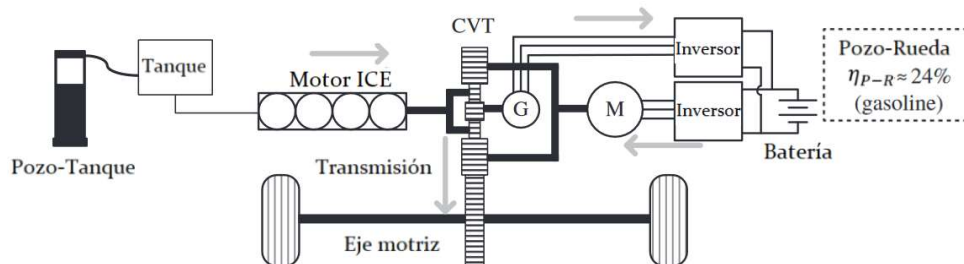


Figura 2.5 Arquitectura de vehículo híbrido serie-paralelo.

### 2.1.2.3 Vehículo eléctrico de celda de combustible (FCEV)

Al igual que el HEV, el vehículo con celda de combustible presenta una batería que se utiliza para absorber las demandas de energía transitoria y la energía regenerativa. La energía no puede regenerarse en la celda de combustible, por lo que se requiere el sistema de batería para la regeneración. Un convertidor de refuerzo unidireccional conecta la celda de combustible con el enlace de CC de alto voltaje que alimenta el accionamiento eléctrico [13]. Una eficiencia del sistema de celda de combustible de aproximadamente 58% es razonable para una celda de combustible

operada en modo de potencia óptimo y protegida por la batería para transitorios. La eficiencia del tren motriz a la rueda es de aproximadamente 78%, un poco más bajo que el valor utilizado en los otros vehículos debido al convertidor de impulso. Por lo tanto, la eficiencia general del pozo a la rueda para el FCEV es aproximadamente del 27%. La arquitectura típica junto con las eficiencias se muestra en la Figura 2.6.

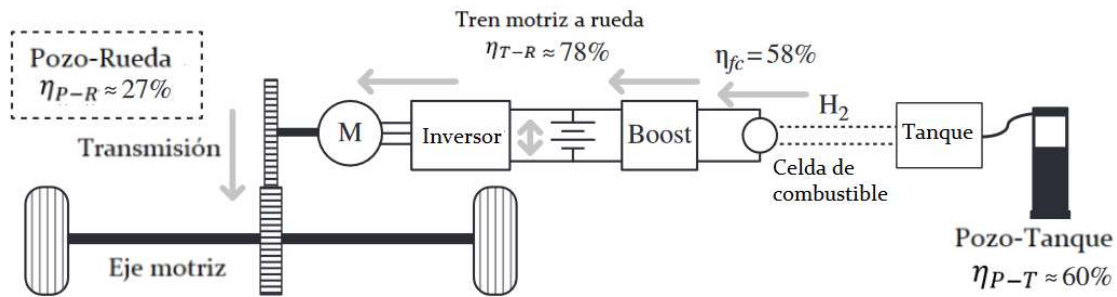


Figura 2.6 Arquitectura de vehículo de celda de combustible.

### 2.1.3 Comparación por eficiencia de vehículos convencionales, eléctricos e híbridos.

La eficiencia total del tren motriz a bordo y del pozo a la rueda para los distintos vehículos se resumen en la Tabla 2.1 El EV y el FCEV tienen la mayor eficiencia general del pozo a la rueda con un 27%, y son seguidos por el HEV paralelo al 24%. El vehículo de gasolina convencional tiene una eficiencia del 14%. Por lo tanto, la electrificación puede mejorar significativamente la eficiencia general de pozo a rueda. La adopción más amplia de las energías renovables y la energía nuclear puede reducir y mejorar las emisiones de carbono relacionadas para EV, FCEV y PHEV.

Tabla 2.1 Comparación por eficiencia de vehículos

Combustible	Eficiencia del tren motriz (%)	Eficiencia pozo a rueda (%)
Gasolina	17	14
Diesel	20	17
Vehículo eléctrico (EV)	80	68
HEV Serie	25	21
HEV Paralelo	28	24

FCEV	45	27
------	----	----

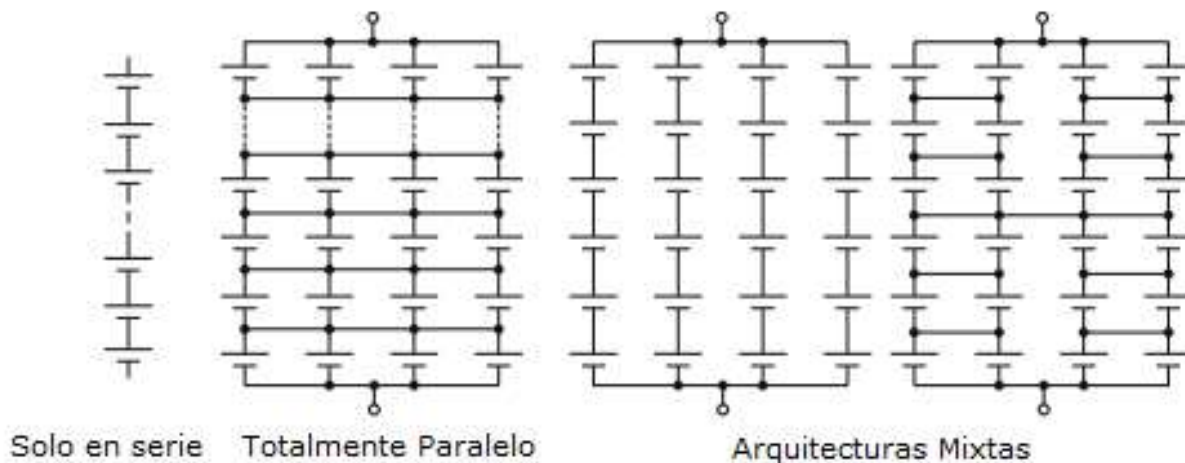
## 2.2 Sistemas de almacenamiento de energía en vehículos híbridos

Algunas de las tecnologías de almacenamiento de energía disponibles para aplicaciones de la automoción son los sistemas de baterías, los ultracapacitores y las pilas o celdas de combustibles, estas son pilas electroquímicas que convierte la energía química de un combustible (a menudo hidrógeno) y un agente oxidante (a menudo oxígeno) en electricidad [14].

Un sistema de baterías es por definición un conjunto de celdas. En las baterías para vehículos se deben implementar una serie de funciones de gestión de baterías para garantizar la integridad estructural, la seguridad, el rendimiento y la vida útil de las mismas.

Las baterías de los vehículos eléctricos cuentan con celdas conectadas en serie para proporcionar un voltaje suficiente para cumplir con los requisitos de la transmisión eléctrica. Para obtener un contenido energético óptimo con respecto a la aplicación deseada, también puede ser necesario conectar las celdas en paralelo.

Son posibles varias arquitecturas de disposiciones en serie-paralelas, la Figura 2.7, muestra las arquitecturas que pueden encontrarse en los vehículos eléctricos.



**Figura 2.7 Arquitecturas de batería con varios conceptos de conectividad de celdas**

Por razones prácticas, las celdas suelen estar dispuestas en módulos. La batería se compone de varios módulos interconectados y de otros componentes:

- Los componentes mecánicos garantizan la integridad estructural;
- Los mazos de cables eléctricos conectan las celdas y los módulos;



- Los fusibles e interruptores/contactores permiten desconectar la batería del resto del sistema de alta tensión (AT);
- Los sensores y las unidades de control electrónico garantizan un funcionamiento seguro y recogen información sobre el estado actual de las células y la batería;
- Dependiendo de los requisitos reales, los dispositivos de calefacción y/o refrigeración pueden regular la temperatura de la batería.

Por razones de seguridad y vida útil, en algunas tecnologías la tensión de cada celda del banco de baterías debe ser supervisada para garantizar que la celda se mantiene dentro del intervalo de tensión de funcionamiento seguro. El control térmico debe ser empleado para prevenir el sobrecalentamiento de las celdas de la batería, al igual que un eventual incendio.

La gestión térmica también es necesaria para garantizar la vida útil de la batería. Las altas temperaturas promueven la degradación de la batería, por lo que las pérdidas térmicas durante el funcionamiento deben ser disipadas de la batería. Especialmente en aplicaciones de alta potencia (P)HEV, el exceso de calor debe ser evacuado por un sistema de refrigeración activo. Se utilizan diversos medios de refrigeración (por ejemplo, aire, líquidos, refrigerantes).

Dado que la corriente, especialmente durante la carga, debe adaptarse a la temperatura de la batería por razones de seguridad y durabilidad, el sistema de gestión de la batería determina la corriente de carga tolerable en función de la temperatura de la batería y proporciona la información a la unidad de carga externa.

La unidad de gestión de baterías (BMS) se comunica e interactúa con otras unidades de control en el vehículo, proporcionando la información necesaria y asegurando una reacción adecuada de la batería a los comandos del conductor [15].

## **2.2.1 Parámetros de las baterías.**

### **2.2.1.1 Índice de capacidad**

Al momento de la descripción de baterías, es común utilizar el índice C, este indica una medida de que tan rápido se carga o descarga una batería, relativo a su capacidad máxima. Es decir, un valor de 1 C descarga el paquete de baterías a una corriente fija dada en una hora, mientras un índice de 10 C descarga el paquete de baterías a diez veces la corriente de 1 C. Un índice C/3 descarga el paquete de baterías a una razón de 1/3 de la corriente de 1 C [16].



### 2.2.1.2 Estado de carga (SOC)

Es la porción de la capacidad total de la batería que está disponible para descarga. Este parámetro se expresa como un porcentaje, y puede ser interpretada como una medida de cuanta energía resta o almacena la batería.

### 2.2.1.3 Profundidad de descarga (DOD)

Es la porción de la energía eléctrica almacenada en la batería que ha sido descargada, se representada como un porcentaje.

Por ejemplo, si un paquete de baterías es de 24kWh y se han descargado 6kWh, el porcentaje de DOD es  $6/24$  que representa un 25%. La energía restante en el paquete es de 18kWh, lo que corresponde a un valor de SOC  $18/24$  o 75% [16].

Las baterías usadas para HEV típicamente tienen un almacenamiento de energía pequeño con un rango relativamente angosto de uso de energía (SOC) comparado con las baterías para un EV, las cuales típicamente tienen un gran almacenamiento y un rango de operación muy amplio.

### 2.2.1.4 Voltaje nominal de celda

El voltaje de la celda es una función de la reacción química dentro de la batería y puede variar significativamente con el SOC, la edad, la temperatura y la tasa de carga o descarga. La tensión nominal de una celda de batería es la tensión media a corriente constante (CC) a lo largo de un ciclo de descarga completo.

Por ejemplo, una celda de iones de litio tiene una tensión nominal de 3,75 V, mientras que la tensión de la celda puede variar de unos 4,2 V cuando está completamente cargada a 2,5 V cuando está completamente descargada.

La Figura 2.8 representa la tensión de una celda de Li-ion en función de la capacidad para los distintos índices de descarga, este tipo de gráficas son conocidas como curvas de descarga. De la gráfica se puede deducir, que al momento en el que una batería se encuentra completamente cargada (0 Ah de descarga en el eje de las ordenadas) el voltaje que la celda dispone para los distintos niveles de descarga está sobre los 4 V, mientras que el voltaje cae a menos de 3 V cuando se ha consumido alrededor de 32 Ah de la capacidad máxima de 33.3 Ah de la celda, incluso llegando a los 2.5 V cuando el valor del SOC es de 0%. La capacidad de la celda de igual forma se ve afectada dependiendo del nivel o velocidad de descarga de la batería (C, C/3, 1.8C, etc).

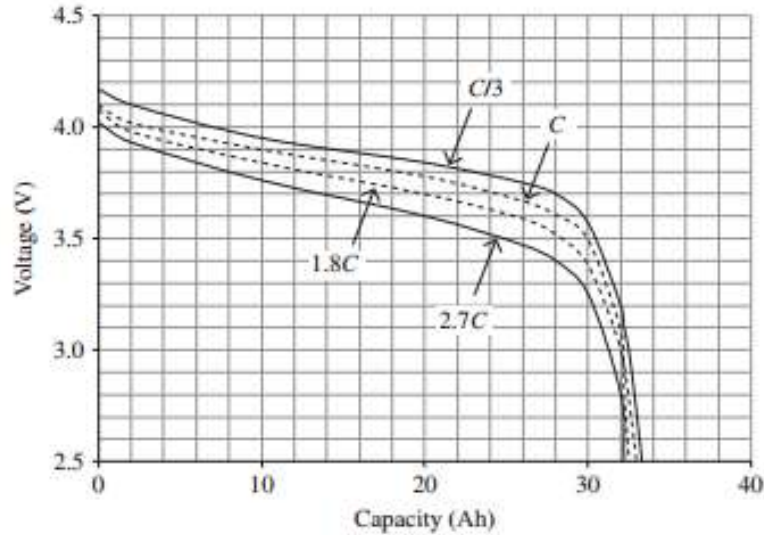


Figura 2.8 Curvas representativas de descarga para una celda de 33.3 Ah de Li-ion [16]

### 2.2.1.5 Energía Específica y Densidad de Energía

La energía específica es la relación entre la cantidad total de energía (Wh) almacenada en los materiales activos dentro de una celda y la masa de la celda (kg). La densidad de energía es la relación entre la cantidad total de energía (Wh) almacenada en los materiales activos dentro de una celda y el volumen de la celda (L). Las baterías de iones de litio tienen la energía específica más alta, presentan valores alrededor de 250 Wh/kg que es aproximadamente 3, 2,6 y 6 veces superior a las baterías de NiCd, NiMH y plomo-ácido, respectivamente. También tienen la densidad de energía más alta, presentan valores alrededor de 693 Wh/L que es aproximadamente 4,6, 2,3 y 6,3 veces superior a las baterías de NiCd, NiMH y plomo-ácido, respectivamente [17].

### 2.2.1.6 Eficiencia Energética

La eficiencia energética se define como

$$u_e = \int_0^{t_d} v_d i_d dt / \int_0^{t_c} v_c i_c dt \quad (2.1)$$

Donde  $t_d$  y  $t_c$  son los tiempos de carga y descarga totales,  $v_d$  y  $v_c$  son los voltajes de la batería durante los procesos de carga y descarga,  $i_d$  y  $i_c$  son las corrientes de la batería que fluyen durante los procesos de carga y descarga respectivamente.





Dado que la tensión en el proceso de carga es superior a la del proceso de descarga, la eficiencia energética es menor a 1. Por ejemplo, la eficiencia energética de las baterías de iones de litio es generalmente de alrededor del 85-95 % [17].

#### **2.2.1.7 Ciclo de Vida**

Es una medida del número de veces que se puede cargar y descargar una batería antes de que llegue al final de su vida útil. El ciclo de vida depende principalmente de la temperatura de la batería, el perfil de descarga y la profundidad de descarga (DOD).

En general, las baterías tienen una vida útil más larga para los ciclos de bajo nivel de DOD. Por ejemplo, las baterías de iones de litio normalmente duran 2000 ciclos a bajas tasas de descarga/carga y temperatura ambiente con el 100% DOD; en ocasiones pueden durar hasta 20000 ciclos al 20-40% DOD [17].

#### **2.2.1.8 Potencia Específica y Densidad de Potencia**

La potencia específica es la relación entre la potencia nominal (W) que puede ser suministrada por una celda y la masa de la celda (kg). La densidad de potencia es la relación entre la potencia nominal (W) que puede suministrarse desde una celda de batería y el volumen de la celda de batería (L). Ambos indican la rapidez con la que las baterías pueden proporcionar la energía necesaria para las cargas o la cantidad de energía que las baterías pueden suministrar en un momento determinado. Las baterías de iones de litio tienen la mayor potencia específica y densidad de potencia.

#### **2.2.1.9 Autodescarga**

La autodescarga es causada por reacciones químicas internas. Reduce la carga almacenada de las baterías incluso cuando no están en uso. Todas las baterías tienen fuga interna (autodescarga) y la fuga aumenta con la temperatura [17].

#### **2.2.1.10 Temperatura de Operación**

Las baterías presentan comportamientos particulares ante cambios en su funcionamiento a temperaturas extremadamente bajas y altas.

La temperatura fría aumenta la resistencia interna y disminuye la capacidad. Una batería que proporciona una capacidad del 100% a 27°C, típicamente entregará sólo el 50% a -20°C. La disminución momentánea de la capacidad difiere con la química de la batería.

Todas las baterías alcanzan una vida útil óptima si se usan a 20 °C (temperatura ambiente) o ligeramente por debajo. Si, por ejemplo, una batería funciona a 30° C en lugar de una temperatura ambiente más baja, la vida útil del ciclo se reduce.

La resistencia interna elevada a bajas temperaturas, causará algún efecto de calentamiento debido a la caída de voltaje al aplicar una corriente de carga. En baterías a base de Níquel como el NiCd, la temperatura de operación puede bajar a - 40° C, la descarga permitida será de solo 0.2 C como máximo. El ion de litio puede funcionar a una temperatura de - 40° C, pero solo a una velocidad de descarga reducida. Con el ácido de plomo existe el peligro de que el electrolito se congele, lo que puede romper la estructura del paquete.

La Figura 2.9 ilustra el voltaje de descarga de una celda de Li-ion bajo varias temperaturas. Una descarga de 3 A de una celda de 2,8 Ah representa una tasa C de 1,07 C. Se distingue la capacidad reducida a bajas temperaturas.

En vehículos eléctricos la baja temperatura reduce la autonomía disponible. Esta pérdida no sólo es causada por el calentamiento eléctrico de la cabina, sino por la ralentización inherente de la reacción electroquímica de la batería, que reduce la capacidad [18].

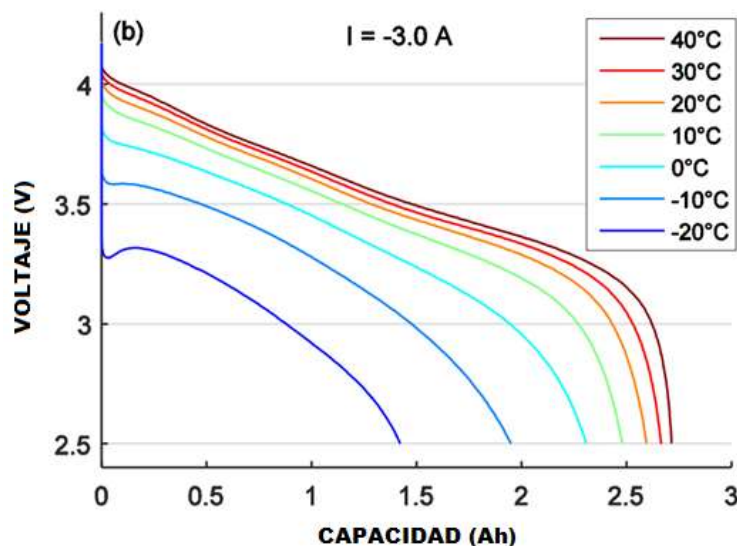


Figura 2.9 Perfiles de descarga de una celda de Li-ion de 2.8Ah a 3A y varias temperaturas.

## 2.2.2 Tipos baterías.

Varias composiciones químicas de baterías son usadas como fuente de energía para alimentar vehículos eléctricos. Estas incluyen composiciones como plomo-acido, níquel-cadmio (NiCd), níquel-metal hidruro (NiMH), y baterías de Li-ion, cada una de ellas tiene sus propias ventajas y desventajas. Sin embargo, para el año 2011, la composición química de baterías líder para vehículos HEV fue NiMH. Luego debido al problema del calentamiento global en la última década, acelerado por los gases de efecto invernadero en parte debido a la sobrepoblación de vehículos ICE, produjo el requerimiento de una mayor densidad energética en vehículos PHEV y EV, esto provocó que la composición de Li-ion entre en el mercado [19].

### 2.2.2.1 Baterías de Plomo Acido

Generalmente se utilizan como batería de arranque en un vehículo ICE. Proporciona una ráfaga corta de alta potencia al sistema de encendido (motor de arranque), poniendo en marcha el motor de combustión interna.

Los electrodos son de plomo y óxido de plomo. El electrolito es una mezcla de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y agua por lo que presentan una capacidad para ser recargables. Las partes comunes que conforman este tipo de baterías se ilustran en la Figura 2.10.

Presentan una resistencia interna baja y se recargan conforme el vehículo se moviliza.

Las desventajas de la tecnología de plomo acido es su baja energía específica (Wh/kg), es decir pesa mucho para la cantidad de energía que puede almacenar, también el uso a bajos niveles de carga (SOC) y la insuficiente aceptación de carga. La energía específica es baja pero la potencia específica es alta, además proporcionan una baja autodescarga [20][21].

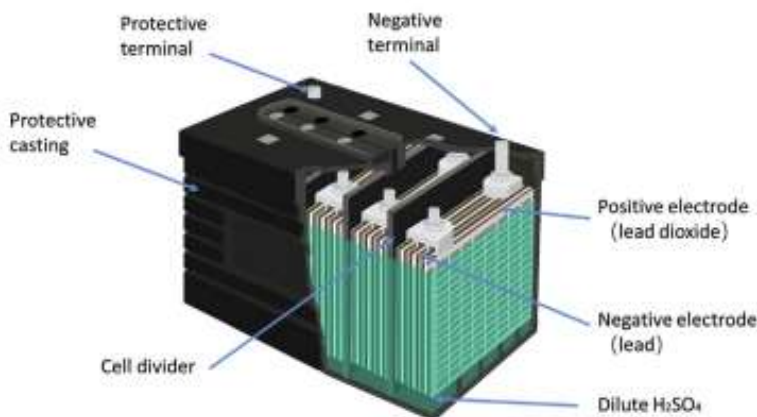


Figura 2.10 Esquema de una batería de plomo ácido



En aplicaciones con vehículos eléctricos híbridos, la operación del SOC se encuentra típicamente entre un 70% (por encima del cual incluso las baterías de alta potencia pierden su capacidad de carga rápida, lo que permite la plena funcionalidad de frenado regenerativo) y un 40% (por debajo del cual el nivel de potencia de descarga, y por lo tanto la funcionalidad de propulsión, se vería comprometida, así como la durabilidad debido a los procesos de envejecimiento facilitados por la descarga profunda). Por lo tanto, la batería HEV normalmente no funciona cerca de su estado de carga completa. Cuando las baterías de plomo-ácido convencionales se exponen a este régimen de estado de carga parcial (PSOC), fallan rápidamente como resultado de la sulfatación (Sulfato de plomo-PbSO<sub>4</sub>) de la placa negativa [15].

El resultado de la operación a tasas PSOC, conduce a una rápida pérdida de capacidad y a una corta vida útil, cuando se utilizan baterías de plomo-ácido convencionales en HEVs.

### 2.2.2.2 Baterías a base de Níquel

Las baterías de Níquel Metal-Hidruro (NiMH), Níquel Zinc (NiZn), Níquel Cadmio (NiCd) y Níquel Hierro (NiFe) son miembros del sistema de baterías alcalinas recargables. Las principales ventajas de la química de las baterías de NiMH y NiZn son las siguientes:

- Elección de celdas cilíndricas o prismáticas con tamaños de celdas flexibles
- Libre de mantenimiento
- Materiales ambientalmente aceptables y reciclables.
- Alta potencia: Los vehículos eléctricos híbridos comerciales que utilizan NiMH obtienen una potencia específica de ~1500 W/kg.
- Flexibilidad de embalaje: Las baterías de NiMH de HEV pueden fabricarse tanto en forma cilíndrica como prismática y están diseñadas para funcionar hasta 320 V.
- Larga vida útil (>1000 ciclos a 100% de profundidad de descarga (DOD) hasta más de 1.000.000 ciclos a 10% de DOD).
- Amplio rango de temperaturas de funcionamiento (-30 a +70°C).

Una desventaja de las baterías de níquel es que tienen tasas de autodescarga relativamente altas [17].

En las aplicaciones HEV, la energía específica es menos importante y se hace hincapié en la potencia. La batería de diseño eléctrico debe ser capaz de soportar la exposición a pulsos de alta corriente tanto durante la carga como durante la descarga. La batería funciona normalmente entre un 50% y un 70% de SOC y utiliza sólo una fracción de su energía disponible (oscilación de SOC del 2-10% típicamente). En este caso, el objetivo principal de la batería no es aumentar su autonomía (como sucede en los EV). En cambio, se utiliza para capturar y almacenar energía de frenado regenerativa, para ayudar a la aceleración del vehículo y mejorar el ahorro de combustible.



Por lo tanto, el objetivo específico de potencia para los desarrolladores de baterías es alcanzar  $>1000\text{W/kg}$ , que los productos químicos de baterías basados en Ni cumplen con creces [15].

Las baterías químicas basadas en Ni pueden fabricarse tanto en formato cilíndrico como prismático. El uso final de la batería determina qué tipo de construcción de la célula es la configuración más adecuada. Para aplicaciones por debajo de 10 Ah, la construcción cilíndrica es el método de elección más frecuente debido a los menores costes de fabricación. En el rango de capacidad de la célula de 10-20Ah, se pueden fabricar tanto diseños cilíndricos como prismáticos. Por encima de 20 Ah predomina la fabricación de la configuración prismática [15].

#### **2.2.2.2.1 Baterías de NiCd**

Las baterías de NiCd pueden sufrir efectos de “memoria”. El efecto memoria es la pérdida de capacidad debido a múltiples cargas parciales. Al igual que el plomo-ácido, estas celdas de batería deben ecualizarse periódicamente para asegurar que cada celda de un paquete de baterías esté igualmente cargada [16][17].

Tienen la mayor vida útil, expresada a través del número de ciclos de carga y descarga (~ 1500 ciclos). Su mayor desventaja es el uso de un metal pesado (Cadmio) en la construcción, con efectos nocivos para el medio ambiente y la salud humana y animal. Las directivas de la unión europea limitan el uso de este tipo de baterías [22].

#### **2.2.2.2.2 Baterías de NiMH**

Las baterías de Níquel metal hidruro (NiMH) utiliza una aleación que absorbe hidrógeno para un electrodo negativo en sustitución del cadmio. Sin usar cadmio, las baterías de NiMH son más seguras y respetuosas con el medio ambiente. Además, las baterías de NiMH proporcionan una mayor densidad de energía y una vida útil más larga que las baterías de NiCd. Poco a poco, las baterías de NiMH han ido sustituyendo a las baterías de NiCd en los mercados [17].

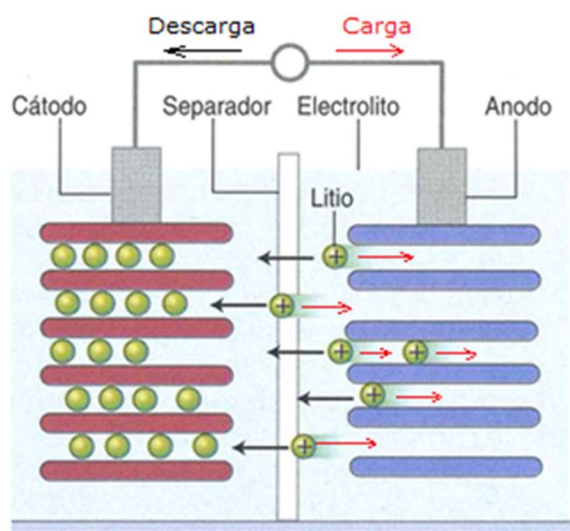
Los principales modos de fallo de las baterías de NiMH son el aumento de la resistencia interna y el desvanecimiento de la potencia o la energía durante el ciclo. El usuario del HEV, experimentará una incapacidad de la batería para ayudar a la aceleración durante la conducción y la incapacidad de utilizar la energía de frenado regenerativa, debido a un excesivo calentamiento causado por las altas corrientes de carga que se suministran.

La tecnología de fabricación y funcionamiento de las baterías de NiMH se asemeja a la de las baterías de NiCd. La principal ventaja de las baterías de NiMH es la ausencia del efecto memoria, lo que afecta a la capacidad de carga máxima de la batería; en comparación con el Li-ion, las baterías de NiMH tienen una menor capacidad de almacenamiento de energía y un alto coeficiente de autodescarga [23].

### 2.2.2.3 Baterías de iones de Litio

Con el fin de lograr un aumento significativo de la densidad de energía y de la densidad de potencia, se han desarrollado baterías de iones de litio. En comparación con las baterías de plomo-ácido y de níquel, las baterías de iones de litio tienen una mayor capacidad de carga y descarga, una vida útil de ciclo más larga y ningún efecto de memoria. Son muy atractivos para aplicaciones en las que el peso o el volumen son importantes, como teléfonos móviles, ordenadores portátiles y vehículos eléctricos. El alto costo inicial ha limitado su uso en aplicaciones sensibles al precio, pero los nuevos productos químicos y las economías de escala prometen reducir el costo de las baterías de iones de litio [12].

La celda de iones de litio pierde su capacidad con el tiempo y los ciclos. El litio activo dentro de la batería disminuye con el tiempo. Voltajes de celda más altos pueden acelerar la pérdida de capacidad. El ciclo de la batería provoca la fractura mecánica de los electrodos y una reducción de la vida útil de la batería. Estos efectos aumentan significativamente con la temperatura [16].



**Figura 2.11** Carga y descarga de una batería de Li-ion

La Figura 2.11 muestra el principio de funcionamiento de las baterías de iones de litio, durante el proceso de carga, el electrodo positivo (cátodo) libera iones de litio al electrodo negativo (ánodo), y en el proceso de descarga, el electrodo negativo (ánodo) suministra iones de litio al electrodo positivo (cátodo). Los iones de litio viajan a través de un electrolito, normalmente hecho de una sal de litio disuelta en un solvente orgánico, producto de la mezcla de carbonatos como carbonato de etileno, dimetil carbonato, y carbonato de dietilo. El separador es una estructura multicapa de polipropileno, que proporciona resistencia a la oxidación, y una parada de alta velocidad en caso de cortocircuito.



Para la tecnología de litio polímero (LiPo) el solvente orgánico del electrolito es sustituido por un compuesto en el cual la sal de litio está contenida en un polímero (sustancia gelatinosa) lo que las hace más flexibles y maleables a la hora de su fabricación.

Los materiales activos del ánodo que se utilizan para la producción son el grafito, el carbono duro, el carbono blando y el titanato de litio. Los materiales activos de cátodo empleados son  $LiCoO_2$  (Oxido de litio cobalto),  $LiM_xNi_{1-x}O_2$ ,  $LiMn_2O_4$  (Oxido de Litio Manganeso) y  $LiFePO_4$  (Litio de hierro fosfato). La combinación de los materiales de ánodos y los materiales de cátodos da lugar a varios tipos de batería de Li-ion [24].

### 2.2.2.3.1 Oxido de litio y cobalto ( $LiCoO_2$ ) LCO

Dispone de una alta energía específica, por lo que es la mejor opción para teléfonos móviles, computadoras, cámaras, etc. Consta de un cátodo de óxido de cobalto y un ánodo de grafito y carbono. El principal inconveniente es su corta vida útil, baja estabilidad térmica y limitadas cargas de capacidad (potencia específica). Una característica de este tipo de baterías es que una carga o descarga no debe ser superior a una tasa C, ya que provoca sobrecalentamiento y estrés excesivo. Los fabricantes por lo general recomiendan para una carga rápida optima a una tasa 0.8C [24], [25]. Las características de una celda individual común LCO se muestra en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Especificaciones de una celda de batería de LCO**

<b>Voltaje</b>	3.60 V y rango operativo de 3.0-4.2 V/celda
<b>Energía Específica</b>	150-240 Wh/kg
<b>Carga (tasa C)</b>	0.7 - 1 C
<b>Descarga (tasa C)</b>	1 C
<b>Ciclo de vida</b>	500-1000 ciclos
<b>Aplicaciones</b>	Teléfonos móviles, tabletas, laptops, cámaras
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	5.1
<b>Densidad Energética</b>	2590 Wh/L

### 2.2.2.3.2 Oxido de litio y manganeso ( $LiMn_2O_4$ ) LMO

La combinación de LMO como material activo del cátodo y grafito para el ánodo, es la química de celda comúnmente usada para aplicaciones de EV. El principal problema que se presenta es la disolución del manganeso a altas temperaturas. Algunas sustancias adicionales ( $LiM_xNi_{1-x}O_2$ ) se añaden para suplir este problema en la práctica. Presenta una baja resistencia interna, lo que permite la carga rápida y una alta descarga de corriente. La mayoría de las baterías de LMO se mezclan con oxido de níquel, manganeso y cobalto (NMC) para mejorar la energía específica y prolongar la vida útil. Algunos vehículos eléctricos como el Nissan Leaf, Chevy Volt y el BMW i3 usan esta tecnología; la parte de LMO de la batería proporciona un alto impulso de corriente en la aceleración y la parte de NMC ofrece un largo rango de autonomía [24], [25]. Las características de una celda individual común LMO se muestra en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3 Especificaciones de una celda de batería de LMO**

<b>Voltaje</b>	3.70-3.80 V y rango operativo de 3.0 - 4.2 V/celda
<b>Energía Específica</b>	150-240 Wh/kg
<b>Carga (tasa C)</b>	0.7 - 1 C típico, máximo de 3C
<b>Descarga (tasa C)</b>	1 C, 10C en algunas celdas, pulsos de 30C (5s)
<b>Ciclo de vida</b>	300-700 ciclos
<b>Aplicaciones</b>	Herramientas eléctricas, dispositivos médicos, motores eléctricos.

### 2.2.2.3.3 Óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto ( $LiNiMnCoO_2$ ) - NMC

Comúnmente utiliza una combinación de níquel-manganeso-cobalto (NMC) para el cátodo y grafito para el ánodo. En ocasiones se usa un ánodo a base de silicio, permite alcanzar capacidades de almacenamiento más altas, pero una capacidad de carga reducida y vida útil más corta. El níquel es conocido por su alta energía específica, pero poca estabilidad, el manganeso tiene la ventaja de lograr una baja resistencia interna, pero ofrece una baja energía específica. Los nuevos



electrolitos y aditivos permiten cargar a 4.4V / celda y más para aumentar la capacidad. Los tres materiales activos de níquel, manganeso y cobalto se pueden mezclar fácilmente para adaptarse a una amplia gama de aplicaciones para sistemas automotrices y de almacenamiento de energía (EES) que requieren ciclos frecuentes. La familia NMC está creciendo en su diversidad, variando las proporciones de los 3 materiales [24], [25]. Las características de una celda individual común NMC se muestra en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4 Especificaciones de una celda de batería de NMC**

<b>Voltaje</b>	3.60 - 3.70 V y rango operativo de 3.0 - 4.2 V/celda
<b>Energía Específica</b>	150-220 Wh/kg
<b>Carga (tasa C)</b>	0.7 - 1 C típico, se carga a 4.30V
<b>Descarga (tasa C)</b>	1 C, 2C corte de 2.50V
<b>Ciclo de vida</b>	1000-2000 ciclos
<b>Aplicaciones</b>	Bicicletas eléctricas, dispositivos médicos, vehículos eléctricos, industriales

#### **2.2.2.3.4 Fosfato de litio y hierro ( $LiFePO_4$ ) – LFP**

Formado por un cátodo de fosfato de litio y un ánodo de grafito. El fosfato ofrece un buen rendimiento electroquímico con baja resistencia, lo que brinda un alto índice de corriente y una larga vida útil, también una buena estabilidad térmica, mayor seguridad y tolerancia. El fosfato de litio tiene una mayor autodescarga que otras baterías de iones de litio. El fosfato de litio a menudo se usa también para reemplazar la batería de arranque de ácido de plomo, cuatro celdas en serie producen 12.80V, un voltaje similar a seis celdas de plomo ácido de 2V en serie. La larga vida útil y la alta capacidad de carga/descarga del LFP han atraído la atención de los fabricantes de baterías para aplicaciones industriales y de automoción [24], [25].

A123 Systems (Livonia, MI, USA) es uno de los fabricantes de baterías más activos en la producción de baterías tipo LFP en el mundo. Dentro de su catálogo, desarrollaron una celda única de 20 Ah como unidad de los sistemas de almacenamiento de energía, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5 Especificaciones de una celda de batería de LFP 20Ah**

<b>Capacidad nominal</b>	20 Ah
<b>Voltaje nominal</b>	3.3 V
<b>Energía</b>	65 Wh
<b>Energía específica</b>	131Wh/kg
<b>Potencia específica</b>	2400 W/kg
<b>Dimensiones (WxHxD)</b>	160 x 227 x 7.25 (mm)
<b>Masa</b>	496 g

La celda se llama prismática, es un tipo de celda de bolsa insertada en un estuche de metal. Estas celdas individuales se conectaron en paralelo y en serie para formar los módulos adecuados. Un ejemplo es un módulo 24-V/100-Ah que consta de 40 células, de las cuales ocho están en serie y cinco en paralelo. De esta manera, son capaces de diseñar sistemas de baterías que cumplan con las especificaciones requeridas y pretenden sustituir estos sistemas de baterías por baterías convencionales de plomo-ácido, utilizadas para aplicaciones de UPS en estaciones de telecomunicaciones y centros de datos [26]. Las características de una celda individual común LFP se muestra en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6 Especificaciones de una celda de batería de LFP**

<b>Voltaje</b>	3.20 - 3.30 V y rango operativo de 2.50 – 3.65 V/celda
<b>Energía Específica</b>	90 - 140 Wh/kg
<b>Carga (tasa C)</b>	1 C típico, máximo de 5C, se carga a 3.65V
<b>Descarga (tasa C)</b>	1 C, 25C en algunas celdas, pulso de 40A (2s), corte de 2.5V
<b>Ciclo de vida</b>	3000 ciclos

<b>Aplicaciones</b>	Portátil y estacionario que necesite altas corrientes de carga y aguante. Vehículos EV y HEV
---------------------	--

### 2.2.2.3.5 Oxido de litio, níquel, cobalto y aluminio ( $LiNiCoAlO_2$ ) - NCA

Comparte similitudes con NMC al ofrecer una alta energía específica, una potencia específica buena y una larga vida útil. NCA es un desarrollo adicional del óxido de litio y níquel, el hecho de agregar aluminio a la composición, incrementa la estabilidad. Estas características hacen de la química NCA un candidato para el suministro de energía en EV. Los puntos negativos implican el alto costo de producción y la seguridad. En la composición el cobalto está presente en un 9% [25]. Las propiedades de las celdas de NCA se presentan en la Tabla 2.7.

**Tabla 2.7 Especificaciones de una celda de batería de NCA**

<b>Voltaje</b>	3.60 V y rango operativo de 3.0 – 4.2 V/celda
<b>Energía Específica</b>	200 - 300 Wh/kg
<b>Carga (tasa C)</b>	0.7 C típico, se carga a 4.20 V
<b>Descarga (tasa C)</b>	1 C, corte de 3 V
<b>Ciclo de vida</b>	500 ciclos
<b>Aplicaciones</b>	Dispositivos médicos industriales, tren motriz eléctrico (Tesla)

### 2.2.2.3.6 Titanato de litio ( $Li_2TiO_3$ ) – LTO

El titanato de litio reemplaza al grafito en el ánodo. El cátodo comúnmente es de óxido de litio manganeso ( $LiMn_2O_4$ ) o NMC. Presenta la capacidad de carga rápida y ofrece una alta corriente de descarga de 10C. Además, tiene excelentes características de descarga a bajas temperaturas y una alargada vida útil. Sin embargo, se está realizando esfuerzos para mejorar la energía específica y reducir los costos de producción, actualmente elevados [25].

Este tipo de batería parece encajar en aplicaciones que requieren mucha potencia, como los HEVs, mientras que su larga vida útil también permite su uso en aplicaciones de almacenamiento de

energía. El desarrollo intensivo de estas baterías ha sido continuado por dos empresas: Toshiba (Tokio, Japón) y Altairnano (Reno, NV, EE.UU.).

Las baterías LTO de Toshiba se denominan SCiB, desarrollaron una celda de 20-Ah para aplicaciones de almacenamiento de energía [24].

La vida útil para que la capacidad de la célula se desvanezca hasta el 80% de la inicial se prevé que sea de 15 años, suponiendo ciclos de velocidad de 3 C durante 1,5 años y 100% SOC flotante durante el tiempo restante [27].

Las propiedades de las celdas de LTO se presentan en la Tabla 2.8.

**Tabla 2.8 Especificaciones de una celda de batería de LTO**

<b>Voltaje</b>	2.40 V y rango operativo de 1.8 – 2.85 V/celda
<b>Energía Específica</b>	50 - 80 Wh/kg
<b>Carga (tasa C)</b>	1 C típico, máximo de 5C, se carga a 2.85 V
<b>Descarga (tasa C)</b>	10 C, pulsos de 30C (5s), corte de 1.80 V
<b>Ciclo de vida</b>	3000-7000 ciclos
<b>Aplicaciones</b>	UPS, tren motriz eléctrico (Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV), alumbrado público alimentado por energía solar.

### 2.2.3 Comparación de tecnologías.

En la Tabla 2.9, se presenta una comparación para las baterías de plomo-ácido, níquel-cadmio, níquel-metal hidruro y un promedio de las de iones de litio, que son las baterías más comúnmente utilizadas en el mercado de la automoción en HEVs y EVs [17], [28].

Tabla 2.9 Comparación de tecnologías de baterías

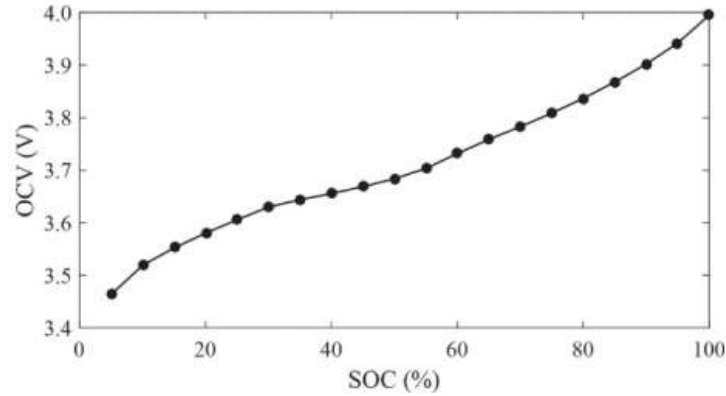
	Plomo-ácido	NiCd	NiMH	Li-ion
Energía Específica (Wh/kg)	33-42	50-80	70-120	110-250
Densidad Energética (Wh/l)	60-110	50-150	140-300	250-693
Potencia Específica (W/kg)	150-250	200	200-300	200-430
Densidad de Potencia (W/l)	450	200	300	800
Voltaje nominal (V)	2	1.20	1.20	3.6 - 4
Tolerancia de sobrecarga	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Autodescarga (por mes)	< 5%	10 %	20 %	< 5%
Temperatura de operación (°C)	-15 a 50	-20 a 50	-20 a 60	-20 a 60
Ciclo de vida	500 ~ 1000	2000	<3000	~ 3000
Eficiencia energética	>80%	75%	70%	85-95%

#### 2.2.4 Tipos de estimación del SOC.

Existe varios métodos de estimación del estado de carga, de forma simplificada ellos se clasifican en cuatro grupos principales: un método basado en tablas de búsqueda, un método integral de amperios-hora (Ah), métodos de estimación basados en datos y métodos de estimación basados en modelos [17].

##### 2.2.4.1 Tablas de Búsqueda

El SOC de la batería está estrechamente relacionado con parámetros característicos externos (estáticos), como la tensión de circuito abierto (OCV). Puede obtenerse utilizando una tabla de búsqueda para representar la relación entre el SOC y los parámetros externos medidos [29].



**Figura 2.12 Relación entre el voltaje en circuito abierto (OCV) y el estado de carga (SOC) en una batería de iones de Litio [17]**

La Figura 2.12 se puede observar que el OCV de la celda aumenta monótonamente a medida que aumenta el SOC. Esta relación puede utilizarse para inferir el SOC a través de un OCV medido. La relación entre el OCV y el SOC se utiliza ampliamente para la estimación del SOC en los BMSs (Battery Management System) para vehículos eléctricos. Sin embargo, es difícil obtener un OCV preciso en tiempo real porque el verdadero OCV requiere que la batería esté en reposo durante un largo periodo de tiempo, lo que no es práctico para las aplicaciones con EV. Por lo tanto, el método de estimación de SOC basado en tablas de búsqueda es más adecuado para su implementación en un laboratorio que en aplicaciones de vehículos eléctricos reales [17].

#### 2.2.4.2 Método Integral de Amperios-Hora

El método integral Ah puede calcular el SOC de la batería con un SOC inicial conocido como

$$z_k = z_0 - \int_{t_0}^{t_k} \eta_i i_L(t) dt / C_{max} \quad (2.2)$$

donde  $z_k$  y  $z_0$  denotan los SOC en el momento  $t_k$  y  $t_0$ , respectivamente,  $t_0$  denota el momento inicial,  $t_k = t_0 + k * \Delta t$ ,  $\Delta t$  denota el intervalo de muestreo,  $\eta_i$  denota la eficiencia de carga y descarga que puede determinarse mediante experimentos,  $i_L(t)$  denota la corriente de carga en una batería, y  $C_{max}$  denota la capacidad máxima disponible [17].

El método integral Ah causa grandes errores de estimación del SOC debido a sus tres inconvenientes. En primer lugar, en la práctica es difícil obtener un SOC inicial preciso. En segundo lugar, la corriente medida puede tener ruido, lo que conduce a errores acumulativos al utilizar la ecuación. En tercer lugar, es difícil obtener en la práctica un valor  $C_{max}$  preciso.

Por lo tanto, el método integral Ah generalmente funcionará con otras técnicas como los métodos basados en modelos para mejorar la precisión de la estimación de SOC.

### 2.2.4.3 Método de estimación basado en datos

Los métodos de estimación basados en datos utilizan una gran cantidad de datos experimentales de un sistema para desarrollar una relación entre la entrada y la salida como se muestra en la Figura 2.13.



**Figura 2.13 Sistema LTI para los métodos de estimación basado en datos experimentales.**

El enfoque basado en datos funciona bien en los siguientes casos:

- El modelo matemático global de un sistema es completamente desconocido.
- Hay muchas incertidumbres para un modelo de sistema.
- Un sistema con estructuras inciertas en su proceso operativo no puede ser descrito por un modelo matemático.
- El modelo de mecanismo de un sistema es demasiado complicado o sus órdenes son demasiado altas, lo que se vuelve prohibitivamente difícil o poco práctico de analizar.

Los métodos de estimación basados en datos, también conocidos como modelos de caja negra, pueden utilizarse para describir la relación fuertemente no lineal entre la entrada (tensión y corriente) y la salida (SOC) de una batería. Algunos de los algoritmos típicos para construir modelos de caja negra incluyen, controladores lógicos difusos, redes neuronales (NN), máquinas vectoriales de soporte y una combinación de estos algoritmos.

La red neuronal se utiliza para desarrollar un estimador SOC, donde la capa de entrada contiene la corriente, la temperatura y el voltaje de la batería, y la capa de salida sólo el SOC. Los resultados muestran que la red neuronal puede proporcionar una alta precisión de estimación de SOC. Sin embargo, los métodos basados en datos son muy sensibles a los datos de entrenamiento. Si los datos de la formación no han cubierto los datos generados en las condiciones de trabajo actuales, el modelo NN establecido sobre la base de los datos de formación puede proporcionar una estimación incorrecta de la SOC [30].

#### 2.2.4.4 Métodos de estimación basado en modelos

Los métodos de estimación basados en modelos utilizan algoritmos de estimación de estado no lineal y filtros adaptativos para estimar el SOC basado en las ecuaciones de espacio de estado derivadas de los modelos de baterías. Como se muestra en la Figura 2.14 los algoritmos típicos incluyen Filtros Kalman [31], Observador de Luenberger [32], observador de integral-proporcional (PI) [33], filtro H infinito ( $H\infty$ ) [34] y el observador de modo deslizante [35].

Los métodos de estimación basados en modelos se combinan con el método integral Ah y el método de la tabla de búsqueda. Su proceso de estimación se explica de la siguiente manera: un SOC inexacto del método integral Ah causa un OCV erróneo, que conduce a los errores de tensión en los terminales estimados. Estos errores se utilizan para corregir el SOC de modo que la tensión estimada de los terminales pueda seguir la tensión medida en los terminales. En otras palabras, la relación entre el OCV y el SOC puede utilizarse para obtener el SOC correcto. Entre todos los algoritmos, los KFs y HIFs se han convertido en las técnicas más generales para la estimación del SOC de la batería en EV [17].

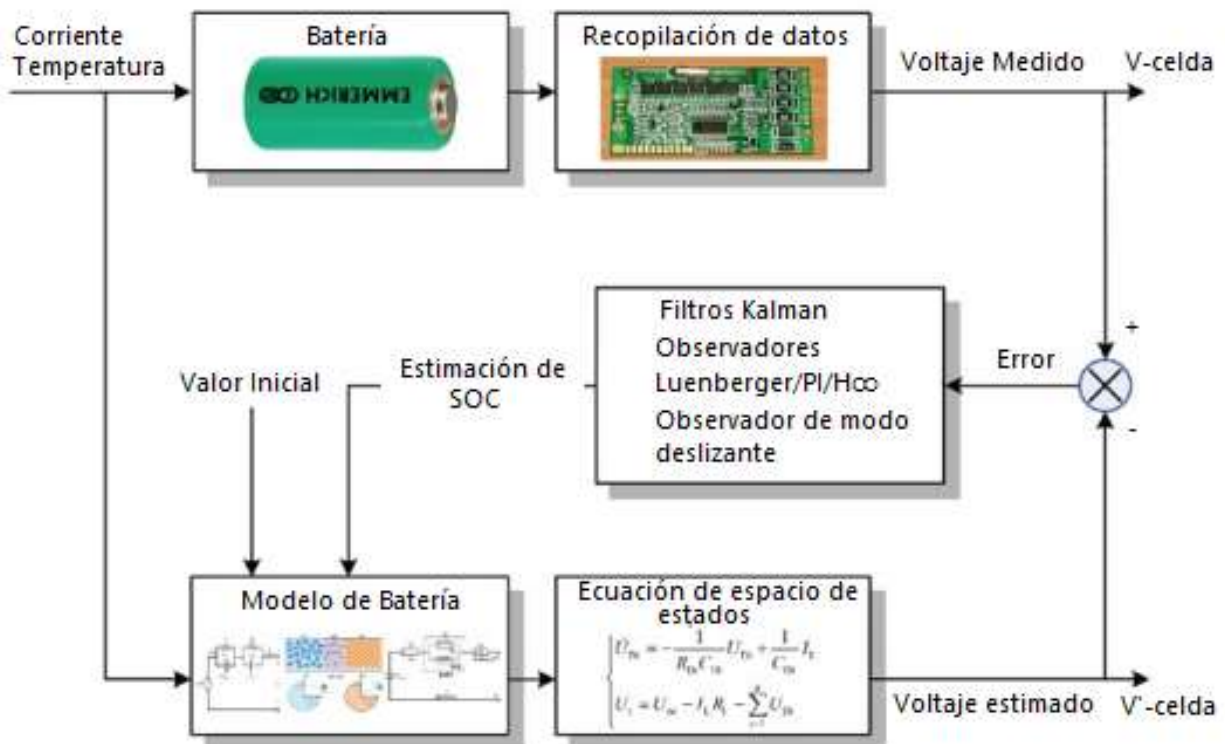


Figura 2.14 Métodos de estimación de SOC basados en modelos [17]



## 2.3 Sistemas de gestión de baterías (BMS)

### 2.3.1 Definición de BMS

El sistema de gestión de baterías (BMS) es un controlador que recoge los datos de las celdas de la batería y de los sensores. El BMS tiene un microprocesador que maneja los datos para compararlos con los estándares de seguridad. Además, transmite los datos recogidos a la interfaz de usuario. Si algún dato excede los límites de seguridad, el BMS interrumpirá la alimentación para garantizar la seguridad del sistema de alimentación. Basado en el número de sensores en las celdas de la batería, el BMS puede verificar la temperatura, corriente y voltaje de celdas individuales para igualar el estado de carga de módulos o celdas de batería separados [37].

El diagrama general de un BMS se ilustra en la Figura 2.15.

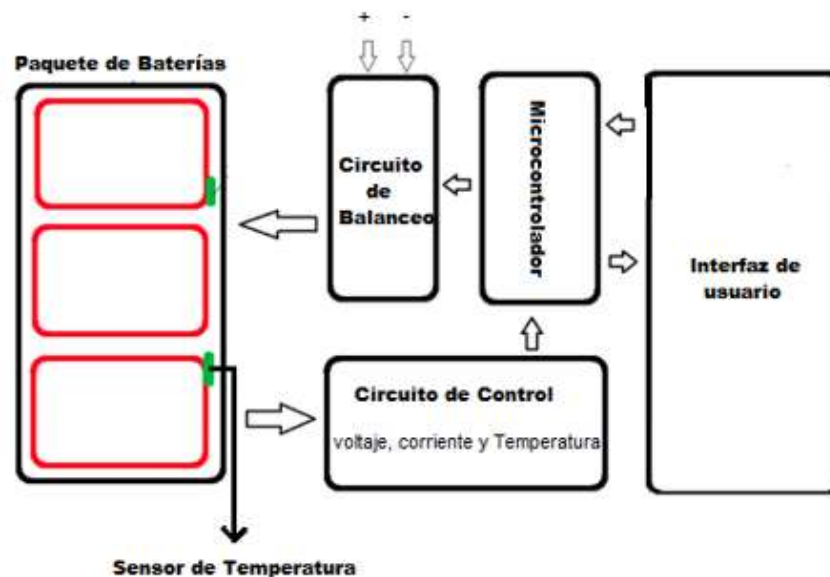


Figura 2.15 Diagrama general de un BMS

### 2.3.2 Funcionamiento del BMS

Existen cinco funciones principales en términos de implementación de hardware en los BMS para vehículos eléctricos [38]:

- Adquisición de parámetros de batería
- Balanceo del sistema de baterías
- Gestión de la información de la batería
- Gestión térmica de la batería
- Control de la carga de la batería

### 2.3.2.1 Módulo de adquisición de parámetros de batería

Para garantizar la seguridad del sistema de baterías, es necesario muestrear la tensión de cada celda, lo que requiere un gran número de canales de adquisición de tensión. Existe dos métodos para realizar la adquisición multicanal. Una opción consta de un circuito discreto que incluye principalmente un multiplexor, un circuito diferencial y un convertidor AD como se muestra en la Figura 2.16.

Con un multiplexor, en cualquier momento sólo una señal analógica entre todas las señales analógicas multicanal se conecta al convertidor AD a través del circuito diferencial que se convierte en una señal digital. Actualmente, la precisión de la medición de tensión oscila entre 5 y 20 mV, dependiendo del número de bits en un convertidor AD. El inconveniente de este método es que no es posible obtener todas las señales muestreadas simultáneamente para diferentes celdas de batería en el sistema de baterías [17].

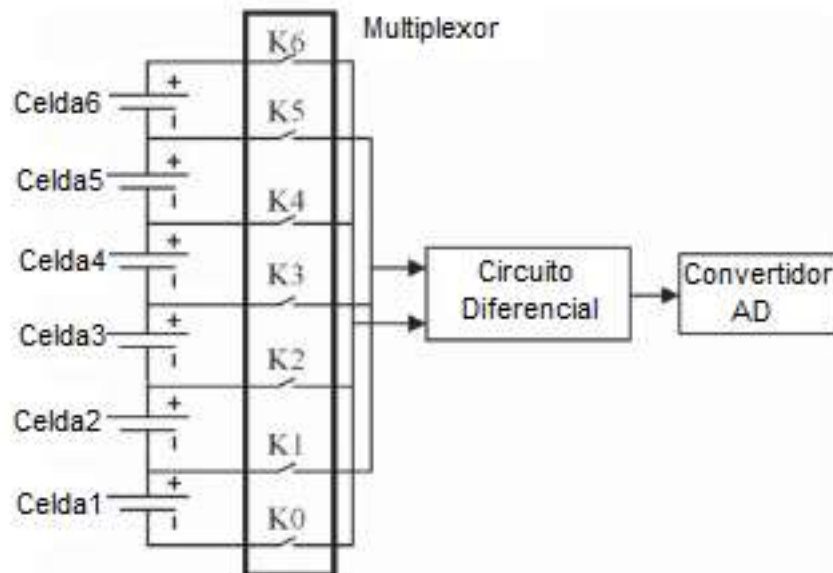
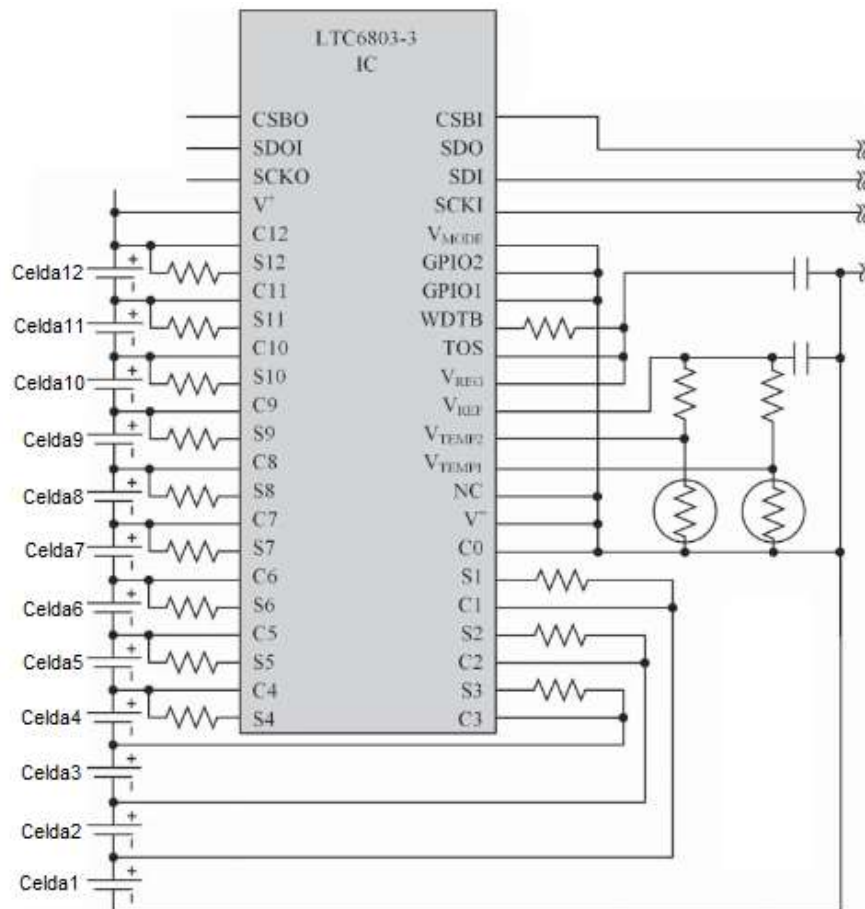


Figura 2.16 Circuito discreto de conversión AD multicanal para el muestreo de la tensión de un sistema de baterías

Otra opción consiste en la utilización de un circuito integrado (CI), para el módulo de adquisición de voltaje.



**Figura 2.17** Medición del voltaje de celda usando el integrado LTC6803-3 [17]

En la Figura 2.17, se muestra un diagrama de un circuito integrado LT6803-3. Este IC puede medir hasta 12 celdas de batería conectadas en serie. Con una interfaz en serie en cadena, se pueden conectar en serie varios LTC6803-3, lo que permite medir el voltaje de todas las celdas de un sistema de baterías. El microcontrolador puede comunicarse con este IC por medio de una interfaz periférica serial. En este circuito integrado se necesitan aproximadamente 13 ms para medir los voltajes de las 12 celdas de la batería. El error máximo de medición es de 0,25%. Soporta diferentes tipos de baterías y supercondensadores [39].

### 2.3.2.2 Módulo de Balanceo del Sistema de Baterías

La igualación de carga de las baterías en EV puede lograrse cargando y descargando las celdas de las baterías. El sistema BMS en el EV monitorea continuamente los estados de carga y voltaje de

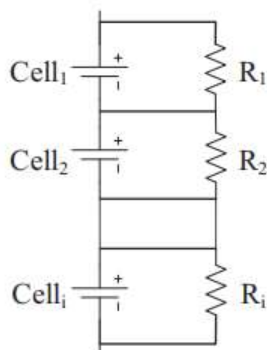
todas las celdas de la batería y detecta las celdas sobrecargadas y sobredescargadas, de modo que activa el controlador de balanceo para igualar la carga y tensión de cada celda de la batería al mismo nivel, cargando o descargando las baterías [40].

Dependiendo de las técnicas de conmutación y transferencia de carga, las categorías de controladores de balanceo de carga se pueden dividir en pasivos y activos.

### 2.3.2.2.1 Circuitos de Balanceo Pasivos

Los controladores de balanceo pasivos son controladores disipativos que convierten la energía de una celda en calor mediante una resistencia de derivación. Estos controladores son los más comunes y simples de todo el rango de sistemas disponible. Dentro de estos se encuentran:

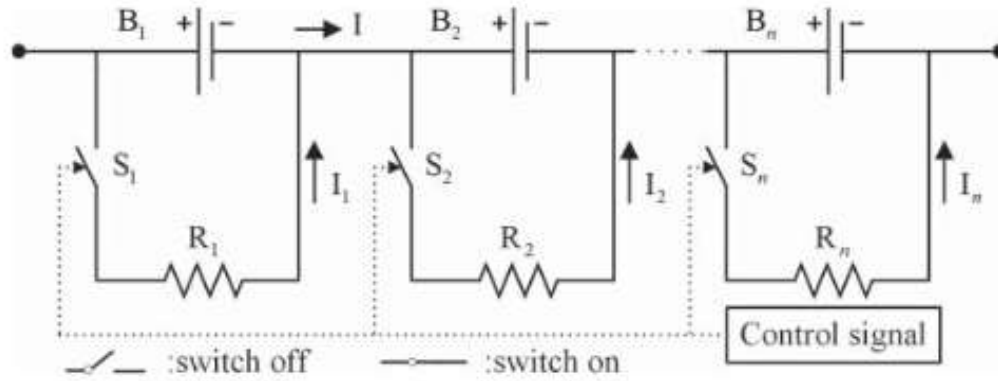
- **Resistencia de derivación fija**



**Figura 2.18 Resistencia de derivación fija**

En la Figura 2.18 se muestra un circuito de balanceo pasivo con resistencia de derivación fija. Una ruta de derivación con una resistencia permite el paso continuo de corriente para todas las celdas de la batería y el voltaje de la celda es controlado por la resistencia ajustable. Este controlador es muy simple y barato, sin embargo, la energía de todas las células se disipa en calor. Se aplica en sistemas de ecualización de baterías de plomo-ácido, Ni-Cd y Ni-MH en aplicaciones de baja potencia para controlar la sobrecarga de las celdas y protegerlas de daños [40].

- **Resistencia de derivación conmutada**



**Figura 2.19 Circuito de balanceo de baterías pasivo con resistores de conmutación en derivación**

La Figura 2.19 muestra un ejemplo de circuito de balanceo pasivo basado en una resistencia de conmutación en derivación [41]. Al adquirir el voltaje de las celdas del paquete en tiempo real, el circuito de control puede determinar la celda de la batería a equilibrar encendiendo el interruptor correspondiente, permitiendo la conversión del exceso de energía en calor a través de la resistencia conectada. Esta configuración es más efectiva y confiable que el controlador de resistencia de derivación fija, simple y puede usarse en el sistema de balanceo de baterías en EV. Sin embargo, también disipa la energía en calor y necesita del sistema de gestión correspondiente.

### 2.3.2.2.2 Circuitos de Balanceo Activos

Los circuitos de balanceo activos son no disipativos, transfieren la energía de celda a celda, de paquete a celda, de módulo a celda, o viceversa. La celda de mayor energía puede entregar el exceso de energía a otra celda, con menor estado de carga, para que el nivel de carga o voltaje sea igual en todas las celdas.

Existen tres categorías de balanceo activo, basado en capacitancias, inductores, transformadores y convertidores de potencia.

- **Controladores de balanceo de carga basado en capacitor**

Los controladores de balanceo basados en condensadores son utilizados para transportar la energía entre la celda y el paquete almacenando energía en el condensador externamente. El control de conmutación se realiza automáticamente al detectar los voltajes de las celdas para un ciclo de trabajo. La Figura 2.20 (izquierda) muestra el condensador de conmutación con  $i$  celdas y  $i-1$  condensadores, que permiten cargar o descargar la celda. Es simple en diseño y control, sin embargo, toma mucho tiempo para la ecualización [40]. El circuito de conmutación simple de la Figura 2.20 (derecha) activa los interruptores de forma adecuada para transferir el exceso de

energía de una celda a otra, tiene un solo condensador y una resistencia para descarga del capacitor.

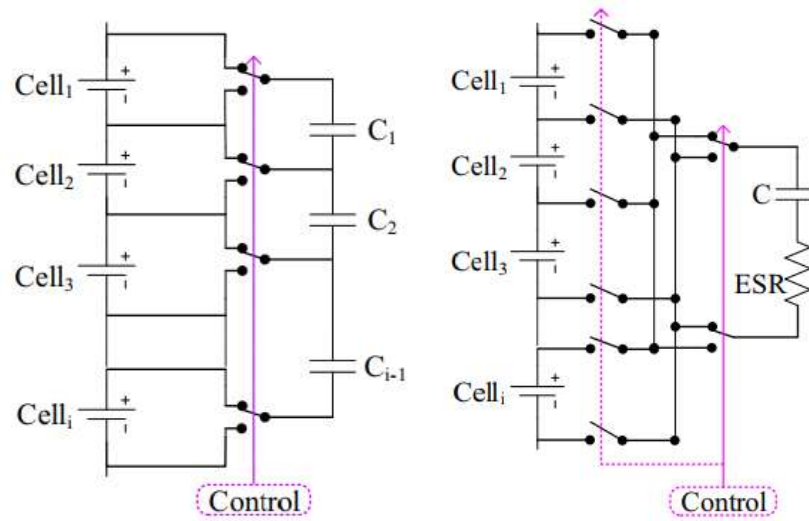


Figura 2.20 Circuitos de Balanceo de carga basados en capacitor

Controladores de balanceo de carga basado en inductor/transformador

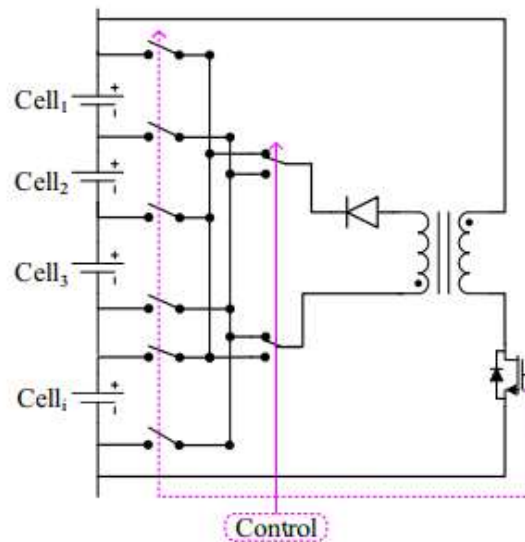
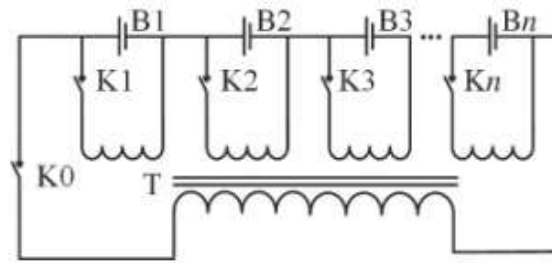


Figura 2.21 Circuito de balanceo de carga basado en transformador de un solo bobinado

El circuito de balanceo basado en transformador de un bobinado utiliza la configuración de circuito como se ilustra en la Figura 2.21. Permite que la corriente de balanceo fluya para transferir energía del paquete de celdas a la celda de menor energía o de la celda con más energía en el paquete, al paquete de celdas completo, a través del transformador mediante el control adecuado de los interruptores [40].

El circuito de balanceo basado en transformador de bobinado primario común se muestra en la Figura 2.22.



**Figura 2.22 Circuito de balanceo de carga basado en transformador de bobinado primario común**

Consiste principalmente en un devanado primario, un interruptor primario, varios devanados secundarios e interruptores de derivación. Suponiendo que la batería B1 tiene más energía que las otras baterías, este exceso de energía debe ser transferido a un paquete de baterías completo. En un primer paso, el interruptor primario K1 se enciende, la energía de B1 se almacena en el campo magnético del transformador. En el paso dos, K0 se enciende y K1 se apaga, la energía almacenada en el transformador se transfiere a todo el paquete de baterías. Estos dos pasos pueden repetirse hasta que todas las celdas del paquete de baterías estén equilibradas. En el caso de la batería con menos energía, los dos pasos pueden funcionar en orden inverso para regular la celda [17].

### 2.3.2.3 Modulo de gestión de información de la Batería

El módulo de gestión de información de la batería tiene tres funciones principales:

- Almacena datos históricos clave de un sistema de baterías, como el SOC o SOH; el análisis de estos datos históricos clave puede mejorar la precisión de la estimación.
- Muestra información clave que incluye la alarma de corriente, tensión, temperatura, SOC/SOH y fallos.
- Comunicación entre los BMSs y otras partes de los EV.

La comunicación se basa principalmente en el protocolo CAN bus, dentro de este se incluye diferentes tipos de buses de comunicación:

- Comunicación interna CAN entre el circuito de monitorización de batería (BMC) y la unidad de control de batería (BCU),
- Comunicación CAN de control entre la unidad de control del vehículo (VCU) y el BMS
- Comunicación CAN de instrumentación para el cargador
- Comunicación CAN de la pantalla y el debugger para actualización y prueba del software.



Los diferentes buses de comunicación tienen velocidades de comunicación no estandarizada. El bus CAN interno requiere una velocidad elevada para garantizar la frecuencia y sincronización de la adquisición de datos, que suele ser de 250-500 kbps. [17]

#### **2.3.2.4 Módulo de gestión térmica (BTM)**

El objetivo principal de un módulo de gestión térmica, es mantener las baterías en el rango óptimo de temperatura de funcionamiento con una distribución uniforme de la temperatura dentro de la celda y el paquete [28].

Las principales funciones del módulo de gestión térmica incluyen:

- Medición y monitoreo de la temperatura de la batería.
- Disipación efectiva de calor cuando la temperatura del paquete de baterías es demasiado alta.
- Calentamiento rápido para adaptarse a temperaturas de funcionamiento baja.
- Igualación de la distribución de la temperatura en un sistema de baterías.

El enfriamiento de las celdas puede ser pasivo (solo se usa el entorno ambiental) o activo (los medios de enfriamiento son forzados por dispositivos incorporados). Según la ubicación de eliminación de calor, los BTMs se clasifican en sistemas internos o externos. Actualmente, la mayoría de las estrategias de gestión térmica son externas, lo que significa que el calor se elimina en la superficie de la batería. La técnica de enfriamiento interno que elimina directamente el calor del interior es una opción prometedora para mejorar la uniformidad de la temperatura, el electrolito líquido que fluye por canales al interior de la celda, se emplea como refrigerante para eliminar el calor generado dentro de la batería. El enfriamiento interno rara vez se estudia, uno de los motivos es que el cierre de las baterías hace que el método sea difícil de implementar [28].

En términos de medio refrigerante, los métodos de gestión térmica pueden clasificarse en enfriamiento por aire, enfriamiento por líquido, enfriamiento por cambio de fase (de líquido a gas), enfriamiento por cambio de fase (sólido a líquido) y la combinación de ellos [28].

Como el enfoque más tradicional, el enfriamiento por aire ha sido estudiado exhaustivamente y es ampliamente adoptado en aplicaciones comerciales. Como ejemplo, el Honda Insight y el Toyota Prius HEV conducen directamente el aire acondicionado de la cabina en el paquete de baterías para enfriarlas [42].



### 2.3.2.5 Módulo de control de carga de la batería

Además de la descarga, el proceso de carga también debe ser supervisado por el BMS. La mayoría de las baterías tienden a reducir su vida útil cuando se cargan de forma inapropiada. El BMS debe asegurarse de que tanto el voltaje como la corriente durante la carga no excedan los límites permisibles para no sobrecargar las baterías, por lo tanto, incluye un control de carga y descarga a bordo. Para las baterías de EV, existen los siguientes procesos de carga de acuerdo al estándar IUoU (DIN 41773) o también conocido como carga de 3 etapas. Este consiste en 3 fases que deben ser ejecutadas por el cargador (Figura 2.23).

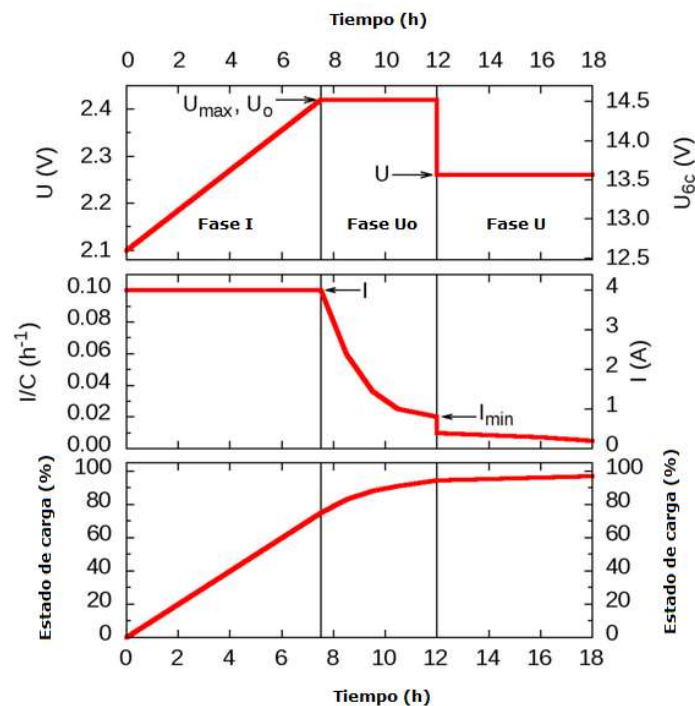


Figura 2.23 Fases de carga en una batería según el estándar IUoU (DIN 41773) [43]

Los regímenes o etapas en el proceso de carga son:

**Fase de corriente constante (Fase I).** - Esta etapa actúa por lo general en baterías que presentan un SOC bajo o están con una descarga profunda. El cargador suministra una corriente constante, típicamente la máxima corriente que el cargador puede suplir a la batería, como resultado, la batería absorbe la carga y su voltaje incrementa hasta un valor límite de  $U_{max}$ . Una vez que se alcanza el voltaje  $U_{max}$ , normalmente cuando el SOC se encuentra alrededor del 70-80%, el cargador entra en la fase  $U_o$ . En el caso de que una batería esté con un SOC del 80% cuando se pone a cargar, el cargador salta directamente a la fase  $U_o$  en lugar de la fase inicial de corriente constante. El valor de la corriente suministrada depende de la capacidad del cargador y

de la batería, es un compromiso entre el tiempo de carga (altas corrientes, menores tiempos de carga) y la prevención de daños por sobrecalentamiento o generación de gases. Por lo general valores de la carga entre  $C/10$  o  $C/2$  son los recomendados para esta etapa.

**Sobretensión constante (Fase  $U_o$ ).** - En esta etapa la batería continúa cargándose a un voltaje constante  $U_o$ , conforme la corriente de carga comienza a disminuir gradualmente. El voltaje en esta fase es muy elevado como para ser aplicado indefinidamente (sobretensión), pero la ventaja es que permite cargar la batería completamente en un corto periodo de tiempo. Esta fase concluye cuando la corriente de carga suministrada disminuye hasta un valor umbral  $I_{min}$ , tras lo cual interviene la última fase de este proceso. Esto ocurre por lo general cuando el SOC se encuentra aproximadamente alrededor de los 95%. El valor de  $U_o$  en algunos casos resulta ser la misma que el valor  $U_{max}$  de la etapa anterior, y en otros casos es incluso ligeramente mayor.

**Voltaje Constante (Fase U).** - Esta etapa también se denomina estado de carga flotante, el voltaje es reducido a niveles en los cuales es seguro suministrarle a la batería durante largos periodos de tiempo sin que la vida útil de la misma se vea comprometida. De igual forma la corriente de carga disminuye gradualmente desde el valor  $I_{min}$ , hasta un valor pequeño el cual es suficiente como para compensar cualquier proceso de autodescarga de la batería.

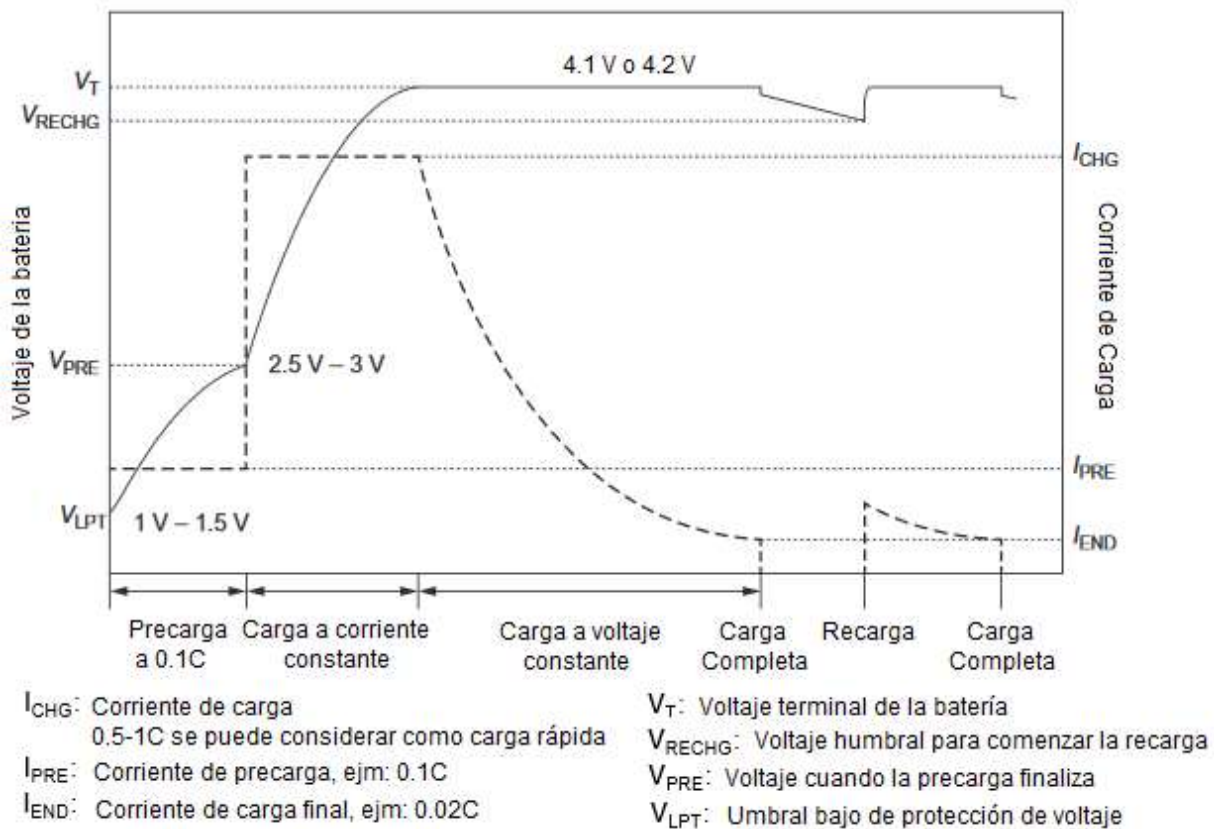


Figura 2.24 Perfil de carga típico en celdas de Li-ion [44]



Existen variaciones de los esquemas de carga, en todos ellos lo que varía, es la forma en la que se va combinando las distintas etapas de voltaje constante, corriente constante o la combinación de ellos. La Figura 2.24 muestra el perfil de carga de una celda de iones de litio. En la etapa inicial, la batería puede ser precargada a una corriente baja y constante. Luego, se carga la batería con corriente constante a un valor superior. Cuando el voltaje de la batería (o SOC) alcanza un cierto punto de umbral, la carga se cambia a la etapa de voltaje constante.

En automoción, es importante que las baterías sean capaces de manejar cargas aleatorias y picos de corriente debido al frenado regenerativo. La potencia de frenado en el frenado regenerativo puede llegar en ocasiones a picos máximos de cien kilovatios, dependiendo de la capacidad del vehículo. El frenado mecánico se utiliza normalmente para ayudar al frenado regenerativo como medida complementaria y de seguridad [44].

## **2.4 Factores que afectan la vida útil de las baterías**

### **2.4.1 Influencia de la temperatura**

Hay dos problemas principales asociadas a la temperatura en las baterías de iones de litio:

1. La temperatura de funcionamiento va más allá del rango admisible;
2. La uniformidad de la baja temperatura conduce a una degradación localizada que acorta la vida útil de la batería.

Para obtener un rendimiento óptimo, la temperatura de funcionamiento en batería de iones de litio debe mantenerse dentro de un rango corto (15-35 °C). Trabajando a temperaturas fuera de esta escala, el rendimiento, la vida útil y la seguridad de las baterías de iones de litio se comprometerá, sin embargo, en las aplicaciones comúnmente es inevitable, controlar este tipo de variables dado a los entornos ambientales hostiles (es decir, temperaturas elevadas o extremadamente frías). Bajo estas condiciones adversas, el rendimiento de la batería empeorará significativamente debido a la temperatura inadecuada de funcionamiento o almacenamiento [28].

Dentro de los comportamientos térmicos inesperados se encuentra:

- Degradación del rendimiento causada por las altas temperaturas.
- Fuga térmica
- Mala distribución de la temperatura
- Comportamiento a bajas temperaturas.



### 2.4.1.1 Degradación del rendimiento

La degradación del rendimiento de las baterías se refiere a la pérdida de capacidad y de potencia a altas temperaturas.

Considerando las combinaciones de diversos materiales de electrodos y compuestos de electrolitos, no es práctico cubrir los mecanismos de degradación del rendimiento de todas estas baterías electroquímicas. Sin embargo, en términos generales, el desvanecimiento de la capacidad se atribuye a la pérdida de litio y a la reducción de material activo dentro de la batería [45], mientras que el origen de la reducción de potencia es el aumento de la resistencia interna de la célula debido a la elevada temperatura [46].

La degradación del rendimiento de la batería también se puede clasificar en pérdida de rendimiento del ciclo y pérdida de rendimiento de calendario en función de si la batería se está utilizando. La pérdida de rendimiento del ciclo se produce cuando la batería está en ciclo (es decir, cargada/descargada). Varios experimentos se realizaron respecto a baterías de Li-ion a diferentes porcentajes de DOD, los resultados indican que al trabajar a temperaturas altas (45 °C - 60 °C) se produce una reducción de la capacidad de almacenamiento en la batería en porcentajes de 70% después de 500 ciclos a 55 °C y de 65% a 60 °C después de 140 ciclos, mientras que a temperaturas más moderadas, de 25 °C después de 140 ciclos solo el 4% de capacidad de almacenamiento se ve reducida [47].

La capacidad/energía se desvanece cuando las baterías de iones de litio se almacenan sin usar, a esto se denomina pérdida de rendimiento de calendario. Por lo general la capacidad de una batería de iones de litio almacenada a altas temperaturas reducirá su capacidad significativamente, por ejemplo en [48], una batería de Li-ion con 650 mAh a temperatura ambiente, bajó a 20 mAh después de almacenarla a 60 °C durante 60 días.

Aunque los materiales de recubrimiento para electrodos positivos y la adopción de compuestos electrolíticos adecuados, pueden mejorar el rendimiento de la batería a temperaturas elevadas, los efectos adversos no pueden ser totalmente eliminados. Por lo tanto, un BMS que puede controlar bien la temperatura de la batería la temperatura es de vital importancia [28].

En la Figura 2.25 muestra como la capacidad de una celda decrece con respecto al número de ciclos a profundidades de descarga (DOD) completos. Por ejemplo, a 25 °C, la celda puede entregar cerca de 5000 ciclos con DOD completos antes de que su capacidad decrezca al 80% de su capacidad original. Si la temperatura de operación sube a 55 °C el número de ciclos para que la capacidad original de batería se decrezca al 80% de su capacidad original se ve reducida, alrededor de 1000 ciclos, 5 veces menos.

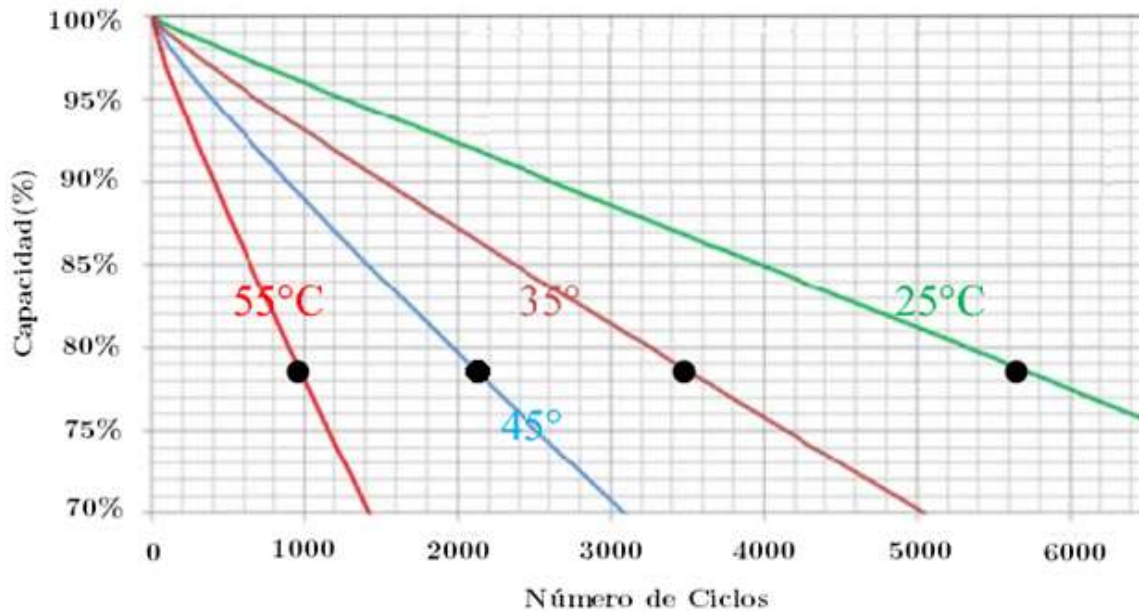


Figura 2.25 Efecto de la temperatura para tasas 1C/-1C, a ciclos de 100% DOD para celdas prismáticas de Li-ion de 20Ah [49].

#### 2.4.1.2 Fuga Térmica

La fuga térmica es una condición indeseable, se produce cuando la temperatura elevada de la batería induce una serie de reacciones exotérmicas que a su vez elevan aún más la temperatura hasta que ocurren incidentes irreparables. Si se produce la fuga térmica, la temperatura interna de una batería de 25 Ah puede llegar incluso a 870 °C [50]. Se presenta la generación de gran cantidad de calor y gas nocivo, que a su vez producen la hinchazón de las baterías, además estos procesos aumentan la presión interna de la batería lo que probablemente se traduzca en una eventual explosión y la presencia de fuego de la estructura de la celda por las altas temperaturas alcanzadas. Es causada por procesos y reacciones drásticos y sucesivos que se alimentan unos a otros. Las reacciones pertinentes durante la fuga térmica incluyen la descomposición de la interfaz electrolítica sólida (SEI), la reacción entre el ánodo y el electrolito, la descomposición del material del cátodo y la descomposición del electrolito. Estas diferentes reacciones, cada una con diferentes temperaturas de inicio, esencialmente forman una cadena de reacciones que resulta en una fuga térmica [51].

Uno de los posibles escenarios que provocan la fuga térmica es la descarga agresiva de la celda (descargas a altas tasas de C) a temperaturas altas (60 °C) o en condiciones deficientes de disipación de calor. Durante esta operación de alta descarga, se genera una cantidad significativa de calor en la celda. En consecuencia, la temperatura de la célula puede llegar a ser lo



suficientemente alta como para desencadenar una cadena de reacciones que en última instancia conducen a la fuga térmica. Las reacciones exotérmicas contribuyen significativamente a la generación de calor global de la celda. Esto puede causar que la generación total de calor en la celda aumente exponencialmente con la temperatura. Además de la disipación de calor de la superficie por transferencia de calor por convección, la conducción de calor dentro de la celda también es de importancia crítica. Una mala conducción del calor dentro de la celda puede limitar la velocidad de eliminación de calor del núcleo de la célula. Esto puede llevar a un gradiente térmico muy grande dentro de la celda, haciendo que el enfriamiento externo sea ineficaz [51].

#### **2.4.1.3 Mala distribución de la temperatura**

Durante el proceso de carga/descarga, se produce calor como resultado de las reacciones electroquímicas y las resistencias internas. La ampliación de los sistemas de baterías provoca inevitablemente una mayor generación de calor en el interior del paquete, especialmente durante la fase de carga/descarga rápida. El calor se acumulará dentro del paquete si no se disipa eficazmente. Además, el coeficiente de convección es mayor en las superficies de las baterías exteriores, lo que proporciona mejores condiciones de disipación que las celdas interiores del paquete. Por lo tanto, hay una gran discrepancia de temperatura entre las baterías en el centro y las que están cerca de los bordes. El rendimiento de una celda individual es una fuerte función de su temperatura, lo que significa que habrá una gran variación de capacidad de celda a celda.

La tasa de generación de calor no es igual en diferentes lugares dentro de una celda de iones de litio, ya que la mayoría de las reacciones electroquímicas se producen en los electrodos. Por ejemplo, un electrodo positivo de  $\text{LiCoO}_2$  genera cuatro veces más calor que el total de la batería. Por lo tanto, los aumentos de temperatura no son uniformes dentro de la celda. Esto causará el deterioro local, que tiene un efecto adverso en el rendimiento de toda la célula y puede resultar en la falla de la batería.

La falta de uniformidad de la temperatura tanto de celda a celda como dentro de las celdas tendrá efectos negativos en el rendimiento general del paquete de baterías. Por lo tanto, debe evitarse la distribución errónea de la temperatura. La desviación máxima de la temperatura en el interior de la batería debe ser inferior a  $5\text{ }^\circ\text{C}$  [28]. La modificación del electrodo puede mejorar la uniformidad de la temperatura intra-celda, mientras que un sistema BMS bien diseñado puede actuar más eficazmente ante la falta de homogeneidad de la temperatura inter-celdas [52]. Desarrollos recientes muestran la viabilidad de utilizar un método de enfriamiento interno que utiliza el electrolito como refrigerante para reducir la falta de homogeneidad de la temperatura dentro de la celda de iones de litio. Los resultados mostraron que la uniformidad de la temperatura de la célula mejora significativamente [28].



#### 2.4.1.4 Comportamiento a bajas temperaturas

Cuando la temperatura es baja, especialmente por debajo de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tanto la energía como la potencia de la batería se reducen notablemente.

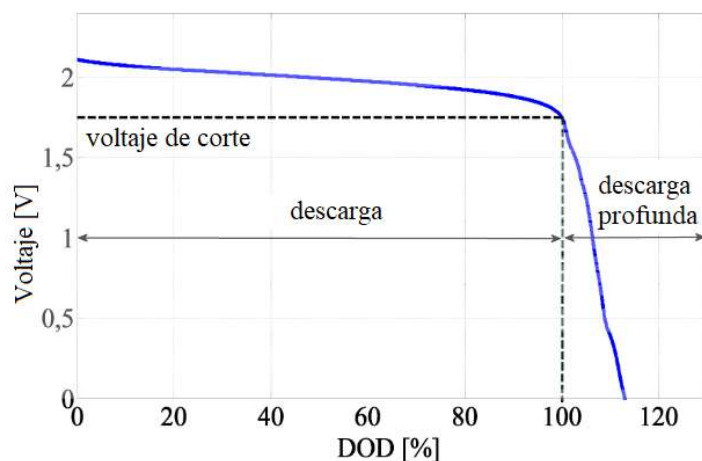
La conductividad iónica más lenta del electrolito a bajas temperaturas ha sido siempre considerada como la causa principal que empeora el rendimiento de las células de iones de litio. Algunos desarrollos de mezclas de electrolitos con bajos puntos de congelación y altas conductividades iónicas mejoran el rendimiento a bajas temperaturas. Además, cargar una celda completamente descargada es mucho más difícil que descargar una totalmente cargada a bajas temperaturas. Esto significa que el rendimiento de carga se degrada más rápidamente que el rendimiento de descarga en condiciones de frío.

Para aliviar los impactos de la baja temperatura, las baterías pueden precalentarse para lograr un rendimiento aceptable. Sin embargo, consume energía adicional que disminuye la eficiencia general del paquete de baterías [28].

#### 2.4.2 Descarga profunda

La descarga profunda significa extraer más capacidad que la capacidad nominal de una batería. El voltaje cae por debajo del voltaje de corte típico, como se muestra en la Figura 2.26. En aplicaciones estándar, los sistemas de gestión de energía evitan este estado de carga. Sin embargo, si solo se controla el sistema completo de la batería, las celdas individuales dentro de una cadena aún pueden verse afectadas [53].



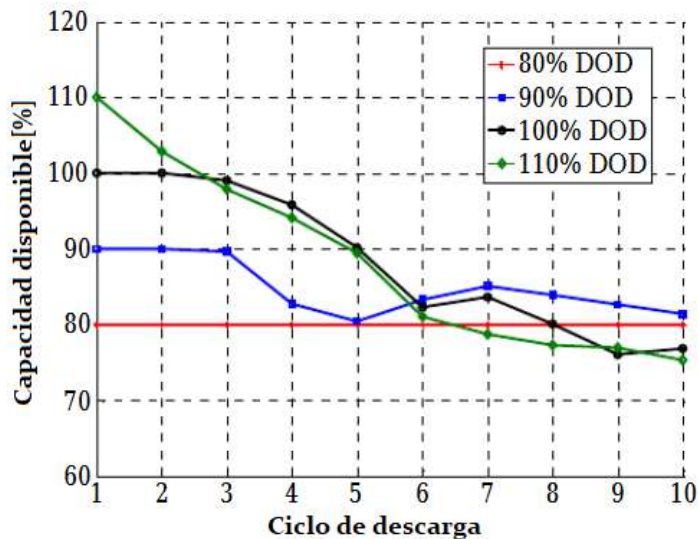


**Figura 2.26** Curva de voltaje en descarga profunda

Es importante no llegar a una descarga profunda, para que el automóvil todavía tenga asistencia eléctrica de alimentación y para evitar problemas con las baterías que pueden ser dañadas por descargas profundas. En caso de presentarse esta situación, resultará difícil restaurar la capacidad original de carga de su batería. Para mantener las baterías en servicio por un largo período, se recomienda que no permita que se descarguen por debajo del 20% de su capacidad. De igual manera al cargarse más de lo necesario, el aumento de la temperatura en la batería es excesivo, y acelera el deterioro de las placas y otras partes internas; esto genera una notable disminución de la vida útil de la batería, por lo cual se recomienda mantener la carga por debajo del 80% [54].

En un experimento se realizó diferentes descargas profundas con cuatro baterías de gel de 10 Ah 2 V [53]. Dentro de una verificación de capacidad estándar con una corriente de carga de 1.0 A, mostraron capacidades entre 8.1 y 8.5 Ah. Posteriormente, se realizaron diez ciclos de descarga con DOD al 80%, 90%, 100% y 110%. Los ciclos de descarga se han detenido según el DOD planificado o si se alcanzó un voltaje de celda de 0 V. Después de diez ciclos, se realizó una prueba de capacidad estándar adicional. La Figura 2.27 y la Tabla 2.10 muestran las capacidades de las cuatro celdas probadas antes y después de los diez ciclos de descarga profunda y las capacidades restantes normalizadas [53].





**Figura 2.27 Degradación de la capacidad después de 10 ciclos de descarga profunda**

La celda 1 pudo descargarse con la carga establecida del 80% de DOD a través de los diez ciclos de descarga. Después de diez ciclos, la celda mostró una capacidad restante del 86%. La celda 2 pudo descargarse con la carga establecida del 90% DOD durante solo dos ciclos; en el tercer ciclo el voltaje cayó a 0 V justo antes de alcanzar la carga establecida. Después de diez ciclos, la celda tenía una capacidad restante del 62%. La celda 3 pudo proporcionar la carga establecida del 100% durante dos ciclos. Obteniendo finalmente una capacidad restante del 56%. La celda 4 podría descargarse al 110% de DOD solo en el primer ciclo. La verificación de la capacidad final mostró un 55% de la capacidad inicial [53].

**Tabla 2.10 Capacidad antes y después de 10 ciclos de descarga profunda**

Celda	DOD realizado	Capacidad antes de 10 ciclos de descarga profunda	Capacidad después de 10 ciclos de descarga profunda	Capacidad normalizada restante
1	80%	8.466Ah	7.315Ah	86%
2	90%	8.313Ah	5.131Ah	62%
3	100%	8.452Ah	4.721Ah	56%
4	110%	8.163Ah	4.516Ah	55%



### 2.4.3 Envejecimiento

Durante la vida útil de una batería, su rendimiento o salud tiende a deteriorarse gradualmente debido a los cambios físicos y químicos irreversibles que se producen con el uso. Para asegurar un cálculo preciso del estado de carga (SoC) mientras una batería envejece, los cambios que tienen lugar en la batería deben ser entendidos.

El envejecimiento tiene lugar inicialmente en la composición química del electrolito de la batería. Los mecanismos de degradación del electrodo positivo y negativo son diferentes. El origen de los mecanismos de envejecimiento puede ser químico o mecánico y depende en gran medida de la composición de los electrodos. A lo largo del tiempo el envejecimiento provoca la degradación de los componentes celulares, lo que puede inducir, por ejemplo, una modificación de las propiedades estructurales, la variación de la composición química del electrolito, o una pérdida de material activo por la disolución de material en el electrolito, como el manganeso. Por lo tanto, los principales fenómenos de envejecimiento provienen de la degradación de los electrodos [55].

#### 2.4.3.1 Efectos del envejecimiento en el electrodo negativo

La mayoría de los electrodos negativos están compuestos de grafito, carbono, titanato o silicón. La elección del material grafito es importante para el envejecimiento y las propiedades de seguridad de una batería. El principal factor de envejecimiento del electrodo de grafito con el tiempo es el desarrollo de una interfaz sólida en la interfaz electrolítica/electrodo, denominada Interface Electrolítica Sólida (SEI). Esta interfaz sólida se crea naturalmente durante la primera carga. Su función es proteger el electrodo negativo de posibles corrosiones y el electrolito de las reducciones [55].

Con el tiempo, hay una pérdida de superficie activa, aumentando la impedancia del electrodo. Un SOC alto (Estado de carga  $> 80\%$ ) debería provocar una aceleración de los fenómenos de deterioro del SEI, ya que la diferencia de potencial entre las interfaces de los electrodos y el electrolito es importante. Además, las condiciones inadecuadas pueden acelerar el proceso, tales como altas temperaturas, sobrecargas y cortocircuitos. Así, bajo altas temperaturas, el SEI puede disolverse y crear sales de litio menos permeables a los iones de litio, aumentando así la impedancia negativa del electrodo. Por el contrario, las bajas temperaturas conducen a una disminución de la difusión del litio dentro del SEI y del grafito, que pueden recubrir el electrodo con revestimiento de litio. Es importante señalar que la formación del SEI, su desarrollo y el recubrimiento de litio son todos responsables de la pérdida de litio cíclico [55].

### 2.4.3.2 Efectos del envejecimiento en el electrodo positivo

El electrodo positivo está sujeto a una baja alteración en el tiempo, dependiendo del material elegido. También existe una creación SEI en la interfaz electrodo positivo/electrolito, que es más difícil de detectar, debido a los altos voltajes en este electrodo. Las principales consecuencias observadas en un electrodo positivo envejecido son: desgaste de la masa activa, degradación del electrolito, oxidación del electrolito y formación de un SEI, interacción entre el elemento del electrodo positivo disuelto en el electrolito y el electrodo negativo. Estos efectos no son independientes y su respectiva interacción difiere según el material del electrodo positivo utilizado. En el electrodo negativo, los efectos de envejecimiento dependen en gran medida del SOC y de la temperatura [55].

### 2.4.3.3 Consecuencias del fenómeno de envejecimiento

En esta parte se identifican dos efectos principales del envejecimiento de la batería: la disminución de la capacidad y el aumento de la impedancia. Ambos fenómenos tienen causas químicas diferentes, por lo que tienen orígenes distintos. Esto implica una dependencia no lineal de estos impactos del envejecimiento. La pérdida de rendimiento es causada por varios mecanismos de base física, que dependen de los materiales de los electrodos.

En términos de rendimiento de las baterías, tanto la pérdida de materiales activos como la pérdida de materiales reciclables conducen a que la capacidad de la batería se desvanezca. En segundo lugar, el crecimiento de la resistencia interna de la batería es generado por las películas pasivas. En la utilización del vehículo, la pérdida de capacidad induce una reducción de la autonomía. Por otro lado, el aumento de la resistencia reduce el máximo de potencia disponible [55].

### 2.4.3.4 Orígenes del envejecimiento

El envejecimiento de la batería se puede dividir en dos partes: el envejecimiento de calendario y el de ciclo. Cada término define las alteraciones causadas por los diferentes usos de la batería. El envejecimiento de calendario responde a los fenómenos y a las consecuencias del almacenamiento de las baterías. Por el contrario, el envejecimiento de ciclo está asociado al impacto de los periodos de utilización de la batería (carga o descarga).

- **Envejecimiento de calendario**



El envejecimiento de calendario es la proporción irreversible de capacidad perdida durante el almacenamiento. La tasa de autodescarga varía mucho según las condiciones de almacenamiento. Por lo tanto, los efectos que se producen dentro de la batería pueden acelerarse o ralentizarse dependiendo de las condiciones de almacenamiento. La principal condición es la temperatura de almacenamiento, cuando la temperatura es alta, se facilitan las reacciones secundarias como la corrosión y la pérdida de litio, la cual es más importante que en condiciones de temperatura moderada, lo que induce a la pérdida de capacidad. Las bajas temperaturas permiten limitar el desarrollo de estos fenómenos, pero estas condiciones generan algunos problemas debido a la pérdida de difusión del material y alteran la química de la batería. La otra variable principal es el nivel de SOC durante el almacenamiento. Para una temperatura constante, pero SOC variable, las celdas no envejecen de la misma manera. Se da una mayor degradación de la batería para SOC elevados, algunos estudios realizados recomiendan almacenar la batería con niveles de SOC alrededor de 50 a 60% [55].

- **Envejecimiento de ciclo**

El envejecimiento de ciclo ocurre cuando la batería está en carga o en descarga. Esto es una consecuencia directa del nivel, del modo de utilización, de las condiciones de temperatura y del requerimiento de corriente de la batería. En la mayoría de los casos, una batería en uso es propensa a los efectos exotérmicos y estos efectos pueden ser facilitados bajo altas temperaturas y provocar el envejecimiento de la batería.

Otra variable que influye en el envejecimiento de la batería de iones de litio y en el funcionamiento del modo de utilización es la tensión de carga/descarga durante su vida útil. Por lo tanto, una alta tensión de carga implica un fenómeno de envejecimiento acelerado. Estudios como en [56] muestran que la vida de la batería se reduce a la mitad para un aumento de 0,1 V de la tensión de carga, el EOL (end of life) se consideró como el 70% de la capacidad inicial. La tensión de descarga influye en el envejecimiento de la batería a través del aumento de la impedancia. Los picos de corriente parecen ser una noción implicada en el fenómeno de envejecimiento, un pico de corriente importante induce un alto nivel de energía entregada por la batería [55].

#### 2.4.3.5 Estimación del envejecimiento

Para evaluar el envejecimiento, se crean varios indicadores o nociones para cuantificar el nivel de salud de la batería. El indicador más utilizado en la literatura es el Estado de Salud (SOH) que generalmente se define por:

$$SOH_{(t)} = \frac{\text{Capacidad nominal de la batería en } t}{\text{capacidad inicial de la batería}} (\%) \quad (2.3)$$



Este indicador representa el desvanecimiento de la capacidad de la batería. Otras definiciones de SOH pueden hacerse a través del criterio de Fin de Vida (EOL) pero sigue siendo una proporción de la capacidad restante de la batería. Como el término "envejecimiento" no está definido con precisión, se introducen otros indicadores adicionales como el Estado de Función (SOF) o la Vida Útil Restante (RUL) [55].

## Capítulo 3: Comportamiento Energético Vehículo Híbrido en Estudio

Este capítulo describe el sistema de almacenamiento original del vehículo híbrido bajo estudio, sus especificaciones técnicas y el diseño montado de fábrica. Se continúa con el detalle del protocolo utilizado para la adquisición de los datos de movilidad del automóvil (OBD), el escenario práctico montado para dicha adquisición, y también las herramientas y procesos realizados para la compresión y procesamiento de los datos obtenidos. Finalmente, una serie de pruebas realizadas en distintos ambientes de conducción bajo distintas condiciones, con el objetivo de caracterizar el funcionamiento del sistema híbrido, encontrar valores típicos de funcionamiento, máximos y mínimos. Estos datos nos servirán en el capítulo posterior al momento de armar el nuevo banco de baterías, ya que dichos datos nos ayudarán a calcular y dimensionar el nuevo sistema de almacenamiento de energía, de modo que se cumplan los requerimientos de potencia y autonomía.

### 3.1 Sistema de almacenamiento de energía original (Toyota Prius C)

Las características de la batería del vehículo híbrido se muestran en la Tabla 3.1. La celda original de NiMH que Toyota usa en la mayoría de sus vehículos híbridos se muestra en la Figura 3.1.

**Tabla 3.1 Sistema de almacenamiento de energía del Toyota Prius C**

<b>Tipo</b>	Níquel-Metal Hidruro
<b>Voltaje</b>	7.2 V / módulo
<b>Capacidad</b>	6.5 Ah
<b>Resistencia Interna</b>	9.6 m $\Omega$
<b>Cantidad</b>	20 módulos
<b>Voltaje total</b>	144 V
<b>Corriente de carga</b>	60A (menor a 10s) 90A (menor a 2s)
<b>Voltaje final de carga (EOD)</b>	9.6 V

<b>Corriente de descarga</b>	90A (menor a 10s) 120A (menor a 2s)
<b>Voltaje de corte en descarga</b>	6 V
<b>Peso</b>	1030 g
<b>Longitud</b>	$283 \pm 1.5$ mm
<b>Ancho</b>	$118 \pm 1.5$ mm
<b>Grosor</b>	$19.6 \pm 0.5$ mm
<b>Ciclos de vida (C/3 carga, C descarga)</b>	3000 veces



**Figura 3.1** Celda original de NiMH del Toyota Prius C

El paquete de baterías alimenta el sistema eléctrico de alto voltaje con corriente continua. El inversor contiene un circuito que aumenta la tensión de 144 voltios de CC a 520 voltios de corriente alterna trifásica para alimentar el motor eléctrico. El inversor también convierte el voltaje CC del generador eléctrico obtenida mediante el frenado regenerativo a CC que carga la batería (Figura 3.2) [57].

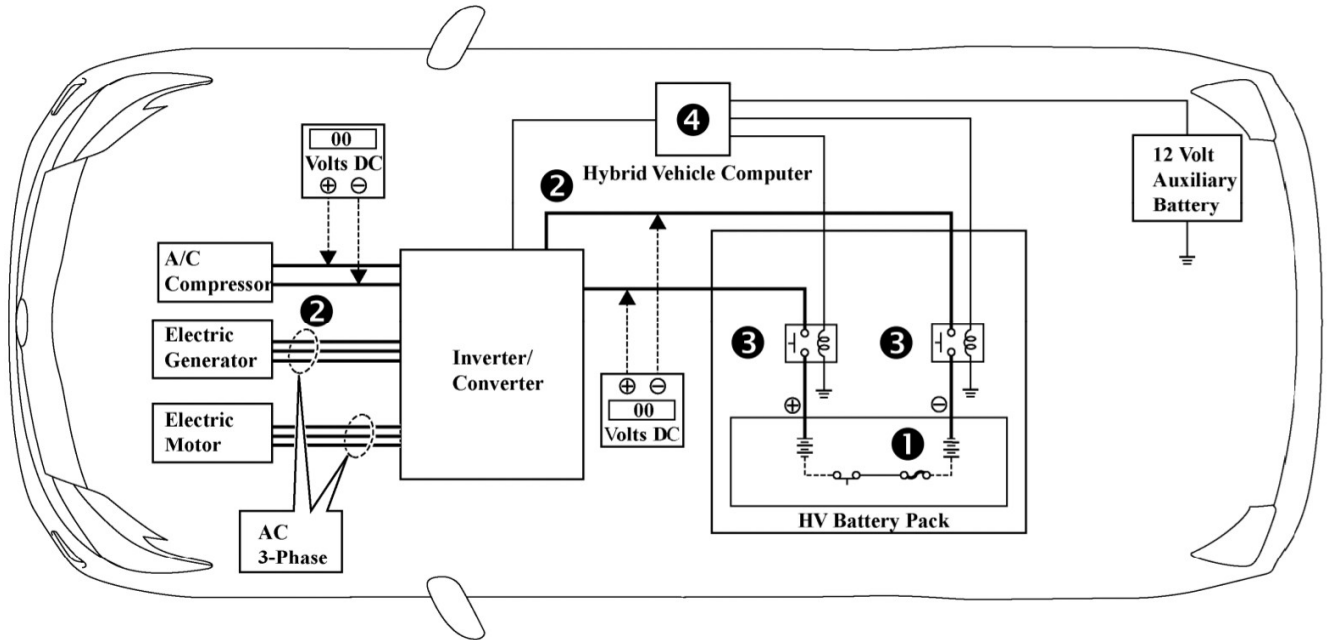


Figura 3.2 Arquitectura del sistema de energía del Toyota Prius C [57]

La unidad de control ECU monitorea el voltaje de cada uno de los 10 bloques de 14.4 V que conforman la batería. Cada bloque de la batería está compuesto de 2 celdas en serie de 7.2 V, dato importante a tomar en cuenta, cuando se realice el armado del nuevo bloque de baterías. A su vez cada celda está conformado en su empaquetado interior por 6 células más pequeñas de 1.2 V cada una. La temperatura es controlada por medio de 3 sensores que están en comunicación con la ECU, la cual controla también un ventilador, para la disipación de calor de la superficie de las baterías por transferencia de calor o convección. También posee un sensor de corriente que es monitoreado por el mismo módulo y relés que controlan el paso de la corriente de la batería hacia el inversor. El inversor luego suministra corriente alterna trifásica al motor eléctrico. La Figura 3.3 muestra al paquete de baterías y la ubicación de la ECU, el ventilador, los relés y los sensores de temperatura, en ella se observan también a todas las celdas que conforman el paquete completo [58].



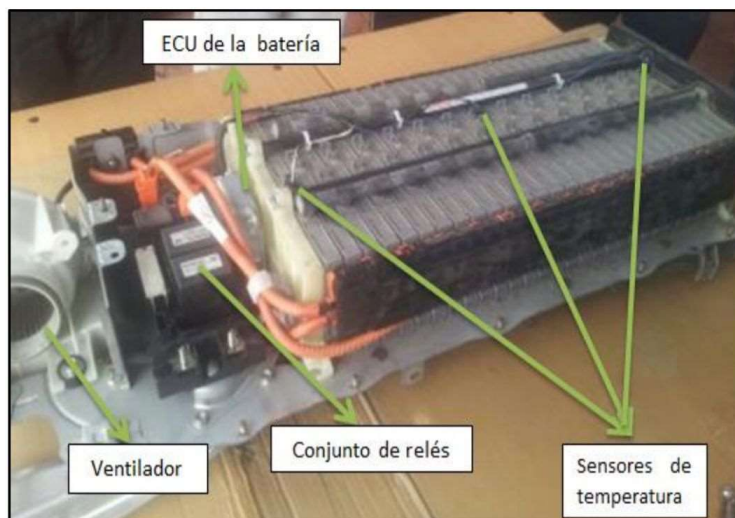


Figura 3.3 Elementos de la batería en el vehículo híbrido [58]

### 3.2 Procedimiento de adquisición de datos

La evolución en la industria de la automoción se ha visto influenciada por el desarrollo de la electrónica moderna; en los modelos actuales de vehículos, la presencia de todo tipo de dispositivos electrónicos como sensores o actuadores (sistema de inyección electrónica de combustible, sistema de transmisión automática, sistemas de control de emisiones, sensores de temperatura, presión, velocidad, aceleración, etc.) va en aumento, de esta manera el costo de estos dispositivos eran del 23% del costo total del vehículo para 2004 y se incrementa en un 40% del costo total para el 2020 [59].

Debido a que estos vehículos modernos están equipados con muchos componentes electrónicos, no es fácil diagnosticar las fallas de los vehículos usando los métodos tradicionales de detección. Por lo tanto, las principales compañías de vehículos desarrollaron un sistema de diagnóstico de fallas, es decir, el diagnóstico a bordo o OBD, en la unidad de control electrónico (ECU) del vehículo.

#### 3.2.1 Sistema de diagnóstico a bordo (OBD)

El sistema de diagnóstico a bordo (OBD) está diseñado para monitorear constantemente la condición de funcionamiento del vehículo. Una vez que hay un elemento de mal funcionamiento, el sistema OBD encenderá la señal indicadora en el tablero o interfaz de usuario del vehículo. Cuando el sistema OBD detecta fallas de funcionamiento, el OBD informará a la ECU del vehículo guardando un Código de Diagnóstico de Problemas (DTC) estandarizado acerca de la información de la falla de funcionamiento en la memoria. Luego mediante una herramienta o



conector de escaneo del OBD se puede acceder al DTC desde la ECU para confirmar de manera rápida y precisa las características de mal funcionamiento y la ubicación de acuerdo con las indicaciones del DTC. Además del DTC, el sistema OBD puede monitorear varios elementos del estado de conducción en tiempo real, por ejemplo, la velocidad del vehículo, las rpm del motor, la posición del acelerador, la temperatura del aire de admisión, la temperatura del refrigerante del motor, voltajes, corrientes y SOC en baterías de EV y HEV, y una serie de variables adicionales [59].

En 1991, se estableció el primer estándar OBD, después la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU (EPA) expandió y trajo el estándar OBD2 de hoy en día. Debido a esto, cada vehículo fabricado después de 1996 está garantizado para cumplir con este estándar.

OBD2 proporciona un marco completo para el control electrónico de todo el motor. También proporciona una manera universal de monitorear y diagnosticar problemas con el chasis, la carrocería y los dispositivos o accesorios del vehículo.

### **3.2.2 Puerto de Comunicación**

La interfaz universal de comunicación al sistema OBD2 del vehículo es el conector SAE J196. Este puerto, es llamado también conector de diagnóstico OBD2.

El conector es una interfaz electrónica de 16 pines que tiene dos filas de ocho pines hembra y una ranura entre ellas. El puerto en forma de “D” viene en dos variaciones. El tipo A maneja sistemas de 12 voltios y el tipo B funciona a 24 voltios.

A pesar de tener espacio para 16 pines, es posible que el conector sólo tenga unos pocos disponibles. Estas diferencias provienen del protocolo de transmisión OBD2 que se utiliza [60].

### **3.2.3 Protocolos de comunicación del estándar OBD2**

El sistema de diagnóstico a bordo, usa distintos protocolos, para la comunicación de datos, dentro de ellos se encuentra el protocolo CAN (Controller Area Network, ISO15765-4). Es el protocolo más moderno, obligatorio para todos los vehículos vendidos a partir del 2008 en los Estados Unidos. Dentro de los protocolos de comunicación se encuentran:

- SAE J1850 Variable Pulse Width
- SAE J1850 Pulse Width Modulation
- ISO 9141-2
- ISO 14230 Keyword Protocol (KWP) 2000

- ISO 15765-4/SAE J2480 Controller Area Network (CAN)

Dependiendo del protocolo de comunicación utilizado, se utilizan ciertos pines del conector de diagnóstico para la adquisición de datos, como se muestra en la Figura 3.4 [60].

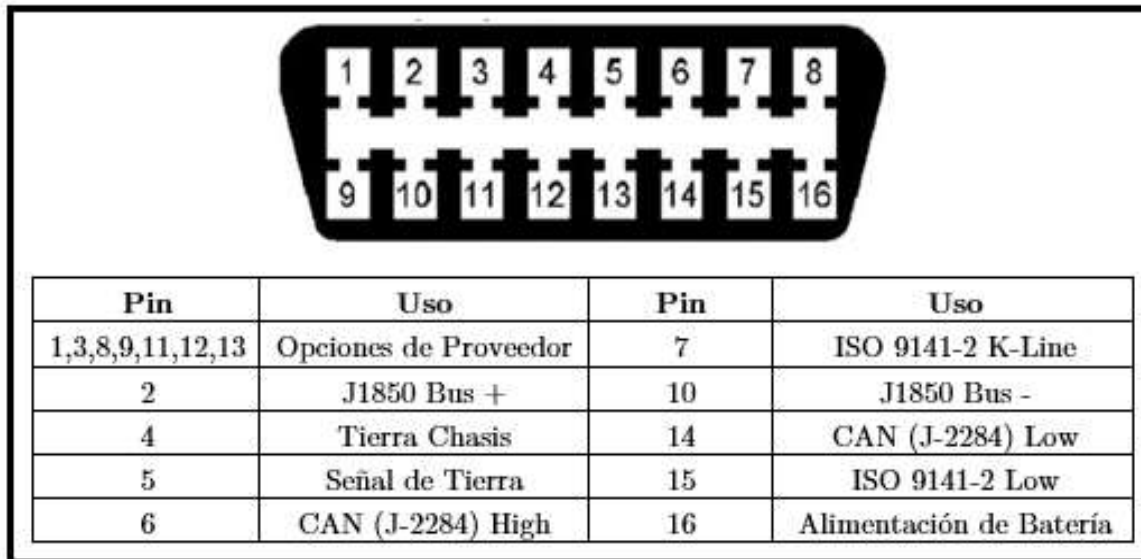


Figura 3.4 Conector de diagnóstico OBD-II y su distribución de pines dependiente del protocolo

### 3.2.3.1 SAE J1850 Variable Pulse Width

General Motors usó la modulación por ancho de pulso variable para transmitir los datos a través del Pin 2 como una secuencia de 10.4Kbps, alternando entre voltajes altos y bajos. De forma básica, es el mismo protocolo que el PWM, con la diferencia de que este último se utiliza para transmisiones a tasas de datos más altas. Usa como protocolo de control de acceso al medio CSMA/CR [61]. En la Figura 3.5 se muestra los pines del OBD para el protocolo VPW.

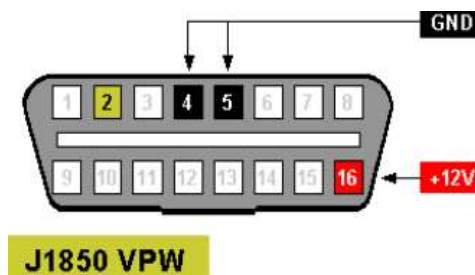


Figura 3.5 Pines del OBD para el protocolo VPW

### 3.2.3.2 SAE J1850 Pulse Width Modulation

PWM es un sistema de transmisión más robusto, utiliza la longitud de pulso para definir sus bits. Debido a esto, requería una señal de reloj separada en el Pin 10 junto con los datos en el Pin 2. Se logran tasas de datos de 41.6 kbps. El protocolo de acceso al medio que utiliza es el CSMA/CR. Fue el protocolo utilizado por Ford para la comunicación de datos de OBD2 [61]. En la Figura 3.6 se muestra los pines del OBD para el protocolo PWM.

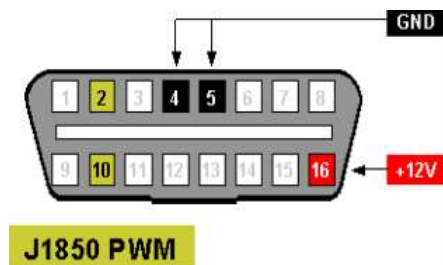


Figura 3.6 Pines del OBD para el protocolo PWM

### 3.2.3.3 ISO 9141-2

El protocolo ISO 9141-2 nace a partir del protocolo serial asíncrono (RS232), por lo que mantiene similitud con este último. Es muy utilizado en Europa y Asia. Posee una velocidad para la transmisión de datos de 10.4 Kbps. La trama a nivel de enlace de este protocolo es la misma que se produce en el protocolo SAE J1850 (12 bytes de longitud). En la Figura 3.7 se muestra los pines del OBD para el protocolo ISO9141-2.

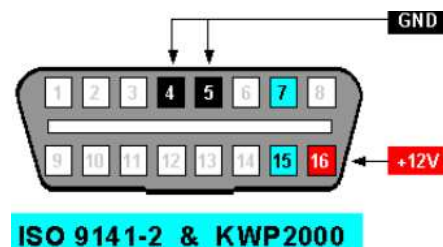


Figura 3.7 Pines del OBD para el protocolo ISO9141-2

### 3.2.3.4 ISO 14230 Keyword Protocol (KWP) 2000

KWP 2000, son las siglas de Key Word Protocol 2000. Con este método se consiguió la estandarización de la comunicación entre el tester OBD y el puerto del vehículo hacia la ECU.



Toda esta comunicación transcurre mediante el principio de pregunta-respuesta, en el cual, el tester manda a la ECU una consulta definida por el protocolo, a la cual la ECU lanza una respuesta inmediata. Esta respuesta puede desde contener algún dato solicitado por el tester hasta tratarse de un simple mensaje de acuse de recibo (ACK). Se utiliza los mismos pines en la comunicación que el protocolo ISO 9141-2(7 línea K y 15 línea L) y funciona a tasas de datos de transmisión de 10,4 kbps. Además, es capaz de contener hasta 255 Bytes en los campos de datos que transmite [61].

### 3.2.3.5 ISO 15765-4/SAE J2480 Controller Area Network (CAN)

Una de las mayores ventajas del protocolo CAN es la garantía y fiabilidad en la transmisión de datos, es por este motivo que el protocolo ha perdurado a lo largo del tiempo, pesa a nuevos desarrollos de protocolos con mayor velocidad o distancia de transmisión, ninguno ofrece la fiabilidad del protocolo CAN, por esta razón es usado en aplicaciones de la automoción, aeronáutica o industria.

La priorización de mensajes y garantía en los tiempos de latencia, es una de las características por las que este protocolo de comunicaciones es ampliamente utilizado en el ámbito de los sistemas de tiempo real [62].

El protocolo especifica varias versiones en donde varían las velocidades de las tasas de datos y las longitudes de los buses (Tabla 3.2), lo que por ende implica una mayor o menor tolerancia a fallos.

**Tabla 3.2 Velocidad del protocolo CAN con respecto a la distancia**

<b>Longitud máxima del Bus</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Tiempo máximo de transmisión*</b>
25 m	1 Mbps	129 us
100 m	500 Kbps	258 us
500 m	125 Kbps	1032 ms
1000 m	50 Kbps	2580 ms
* mensajes de 129 bits de longitud		

La versión de mayor fiabilidad en la transmisión es la de menor tasa de datos, 50 Kbps, y también es en la que se presentan las mayores longitudes para los buses de datos. En la comunicación se utilizan los pines 6 y 14 del conector de diagnóstico OBD (Figura 3.8).

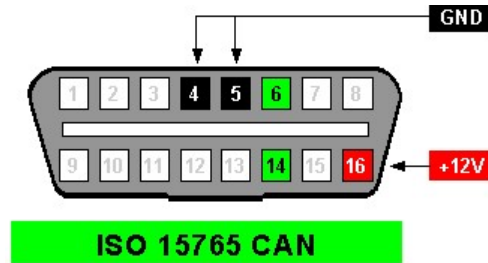


Figura 3.8 Pines del OBD para el protocolo ISO15765 CAN

Un módulo CAN se compone de dos elementos básicos:

- Controlador: Gestiona el montaje de las tramas CAN, comprobación de errores en la transmisión, o en otros nodos, así como de la detección de colisiones,
- Transmisor / Receptor (Transceiver): Este módulo es el encargado de la codificación y decodificación de los mensajes en el bus, sincronización, control de los niveles de la señal o del control de acceso al medio.

La Figura 3.9 muestra la arquitectura típica de este protocolo de comunicación [63].

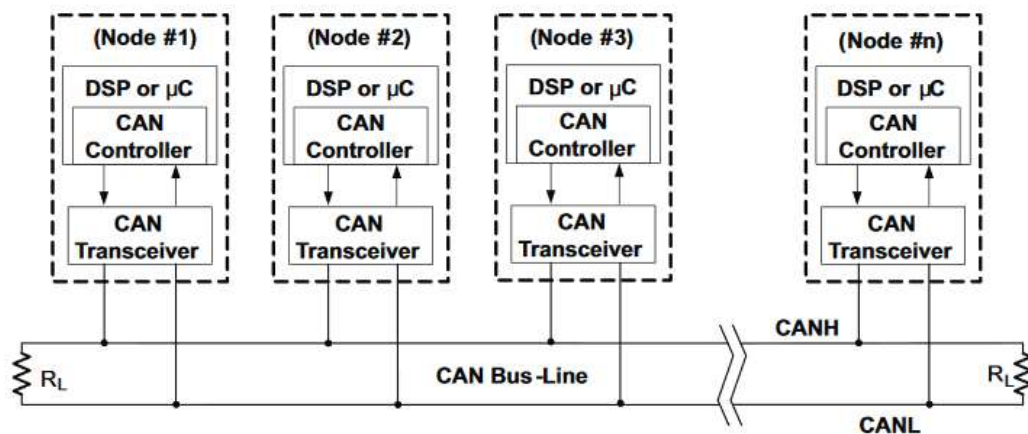
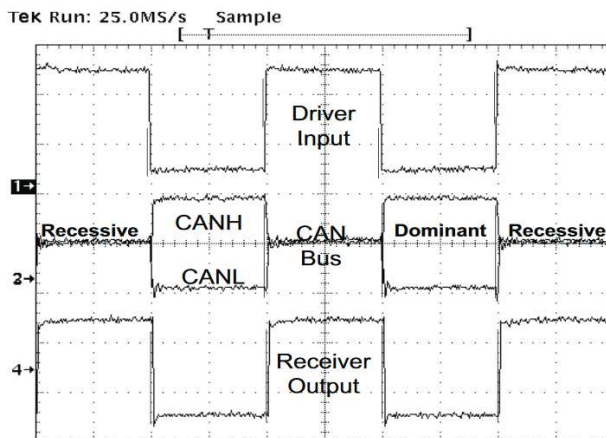


Figura 3.9 Arquitectura del protocolo de comunicación CAN.

Cualquier dispositivo conectado al bus de transmisión puede enviar mensajes, y todos los nodos conectados lo recibirán. Un identificador asociado al mensaje permite identificarlos. De este modo, cada nodo puede procesar los mensajes que necesite o, por el contrario, ignorarlos.

Para la topología en forma de bus, son necesarios dos cables trenzados con una impedancia de  $120\Omega$  ( $R_L$ ). Las señales de estos cables se denominan  $CAN_H$  (CAN high) y  $CAN_L$  (CAN low) como

se puede ver en la Figura 3.10 y dependiendo del voltaje, el bus puede encontrarse en modo recesivo (ambos cables con el mismo nivel de tensión) o en modo dominante (diferencia de tensión entre los cables de al menos 1,5V). Este modo de comunicación tiene como objetivo proporcionar una mayor protección frente a interferencias electromagnéticas [63].



**Figura 3.10 Estados del bus dominante y recesivo del protocolo CAN**

El estándar CAN define una red de comunicación que une todos los nodos conectados a un bus y les permite hablar entre ellos. Puede haber o no un nodo de control central, y los nodos pueden agregarse en cualquier momento, incluso mientras la red está funcionando (conexión en caliente).

Una aplicación real puede incluir un sensor de temperatura que envía una actualización de temperatura que se utiliza para ajustar la velocidad del motor de un ventilador. Si un nodo del sensor de presión desea enviar un mensaje al mismo tiempo, el arbitraje asegura que el mensaje se envíe. Por ejemplo, el Nodo A en la Figura 3.11 y la Figura 3.12 [63], termina de enviar su mensaje (en el lado izquierdo de la Figura 3.9) cuando los nodos B y C reconocen que se está recibiendo un mensaje correcto. Los nodos B y C comienzan entonces el arbitraje: el nodo C gana el arbitraje y envía su mensaje. Los nodos A y B reconocen el mensaje de C, y el nodo B continúa con su mensaje.



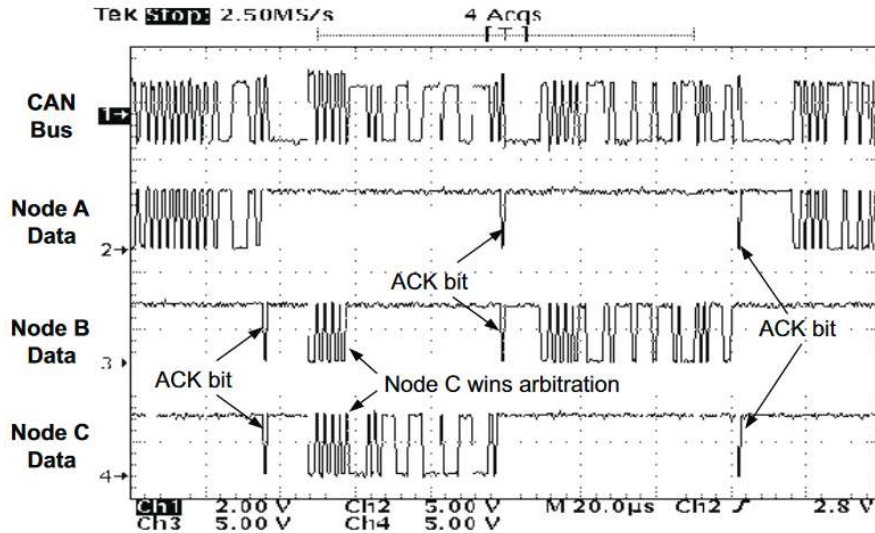


Figura 3.11 Trafico del bus CAN

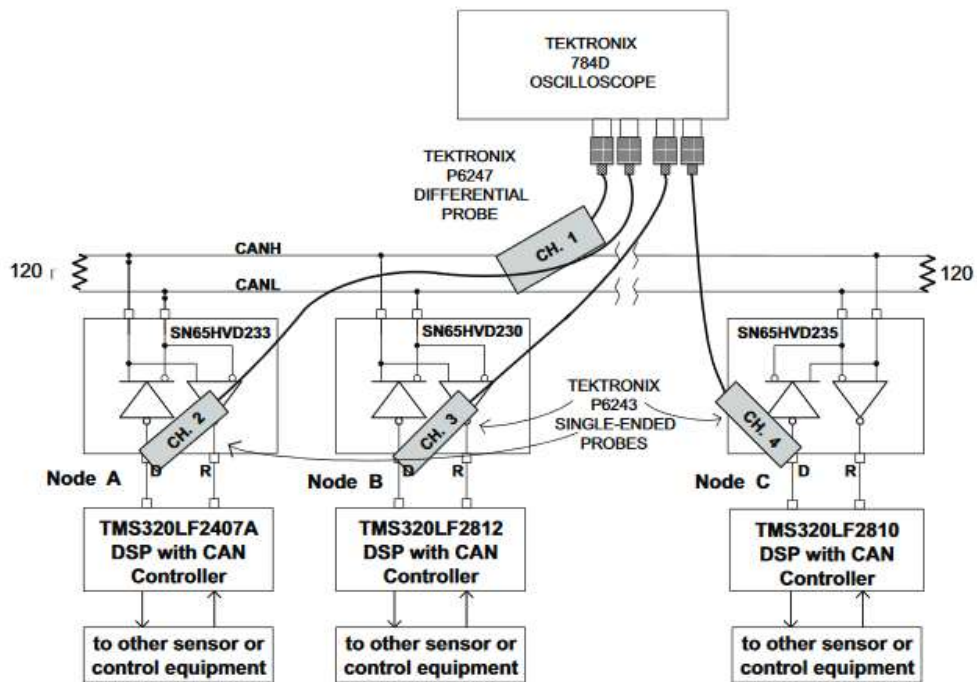


Figura 3.12 Prueba del Bus CAN

Para controlar las colisiones en la transmisión se usa como protocolo de control de acceso al medio CSMA/CD+CR (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection + Collision Resolution). Antes de transmitir, los nodos deben consultar si el bus de datos, se encuentra en una transmisión activa, proveniente de otros nodos, y luego de un tiempo en el cual el nodo se asegure que no haya actividad alguna en el bus, comienza la transmisión, si en ese momento otro nodo trata de transmitir la característica de CD+CR implementa un campo para la identificación y que permite realizar el arbitraje, cada nodo tiene asignado un campo de 11bits con prioridad, el nodo con el



campo identificador de mayor prioridad siempre gana el acceso al bus. El nodo que detecta la colisión, deja de transmitir inmediatamente y espera hasta finalizar la comunicación del otro nodo para intentarlo nuevamente. Existe una versión del campo de identificación extendido en la trama CAN para 29 bits, permitiendo una mayor cantidad de números de identificación lo que conlleva a una mayor cantidad de nodos en el bus [63].

### 3.2.4 Escenario práctico para la adquisición de datos

Para las distintas pruebas que se desarrollan a lo largo de este trabajo experimental, el dispositivo o conector de diagnóstico OBD2 utilizado se muestra en la Figura 3.13.



**Figura 3.13 Conector de Diagnostico OBD2 (Wsiiroon Car WiFi OBD2) usado en las mediciones**

Este dispositivo se conecta con el puerto OBD2 del vehículo Toyota Prius C, a la vez crea una red Wireless IEEE 802.11 (WiFi), en donde se permite conectar un smartphone, Tablet u ordenador para la adquisición de los datos. Existen varias aplicaciones gratuitas y de pago en las tiendas de iOS y Android que brindan la posibilidad de seleccionar y extraer valores de las variables de los distintos sensores (RPM del motor, el valor calculado del SOC, la temperatura del refrigerante, el estado del sistema de combustible, la velocidad del vehículo, la temperatura del aire de admisión, la posición absoluta del acelerador, etc.) en formatos de archivos con extensión CSV los cuales después mediante el software MATLAB, se pueden obtener gráficas de comportamiento a lo largo del tiempo sobre las variables bajo análisis.

Según el catálogo del conector, el producto admite todos los protocolos de comunicación de OBD2, como son el ISO15765-4 (CAN), ISO14230-4 (KWP2000), ISO9141-2, J1850 VPW, J1850 PWM.

El conector al tener acceso al bus de datos CAN del vehículo ofrece la posibilidad de poder leer los códigos DTC (códigos de diagnóstico de problemas) y a través de la aplicación móvil interpretar dicho código y saber su significado, así como saber dónde ubicar el problema del mal

funcionamiento. De igual forma, permite borrar el código de error del tablero del vehículo, si el conductor así lo requiere.

### 3.2.4.1 Aplicación móvil para adquisición de datos

Para la adquisición de datos en los próximos puntos del trabajo de investigación se utilizará una aplicación móvil para un smartphone Android, esta se conecta a la red Wifi creada por el conector de diagnóstico OBD2, en concreto la aplicación de pago Torque Pro (Figura 3.14). Esta aplicación ofrece una serie de variables como el voltaje o corriente de cada celda o del banco de baterías, temperatura de los bancos de baterías, datos de aceleración, de ubicación (GPS), velocidad, SOC, la potencia de la batería (KW y hp), el torque generado por el frenado regenerativo, entre otras.



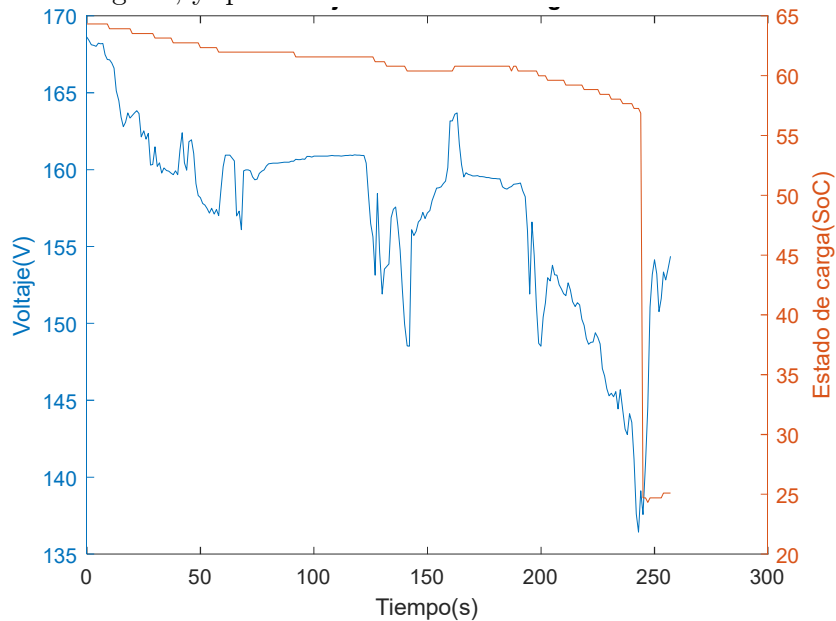
Figura 3.14 Aplicación móvil Torque y algunas de las variables que permite monitorizar

Al finalizar la toma de datos en una ruta, la aplicación genera un archivo con extensión .csv (valores separados por comas), que puede ser leído o manejado por cualquier software, como Microsoft Excel o en nuestro caso MATLAB, donde se obtiene graficas más profesionales y comprensibles.

### 3.2.4.2 Representación de datos obtenidos

Los datos obtenidos desde la app móvil se los procesa en un script de MATLAB, de una forma en la que se ajuste los ejes de coordenadas tanto en el tiempo (segundos) y los rangos de las celdas en los que se ubican los datos de interés.

En la Figura 3.15 se presenta una gráfica que ilustra el voltaje del paquete de batería versus el estado de carga, en un tiempo de 255 segundos. De esta grafica se puede deducir como el voltaje disminuye gradualmente, al punto de llegar a bajar a valores menores de 140 V y el SOC presenta una descarga inmediata desde los 57% a los 25%, esto indica el mal estado en el que se encuentra el paquete de baterías original, y que se encuentra al final de su vida útil.



**Figura 3.15 Gráfica de voltaje del paquete versus el estado de carga para una prueba en una ruta aleatoria**

### 3.3 Comportamiento en rutas típicas, descarga y carga de las baterías y estimación de su ciclo de vida

Para estimar el comportamiento de la batería del vehículo híbrido es necesario entender la forma en la que dicho vehículo utiliza la energía suministrada por los motores, o los distintos modos de conducción que presenta.

- Durante la aceleración ligera a bajas velocidades, el vehículo es impulsado por el motor eléctrico. El motor de gasolina se apaga.



- Durante la conducción normal, el vehículo es impulsado principalmente por el motor de gasolina. El motor de gasolina también alimenta el generador para cargar la batería y para accionar el motor eléctrico.
- Durante la aceleración total, como al subir una colina, tanto el motor de gasolina como el motor eléctrico contribuyen con el movimiento del vehículo.
- Durante la desaceleración, como al frenar, el vehículo regenera la energía cinética de las ruedas delanteras para producir electricidad que carga el paquete de baterías.
- Mientras el vehículo está parado, el motor de gasolina y el motor eléctrico están apagados, sin embargo, los servicios auxiliares del vehículo permanecen encendidos debido a la batería auxiliar.

Con este comportamiento característico se realizaron pruebas en los siguientes entornos de conducción:

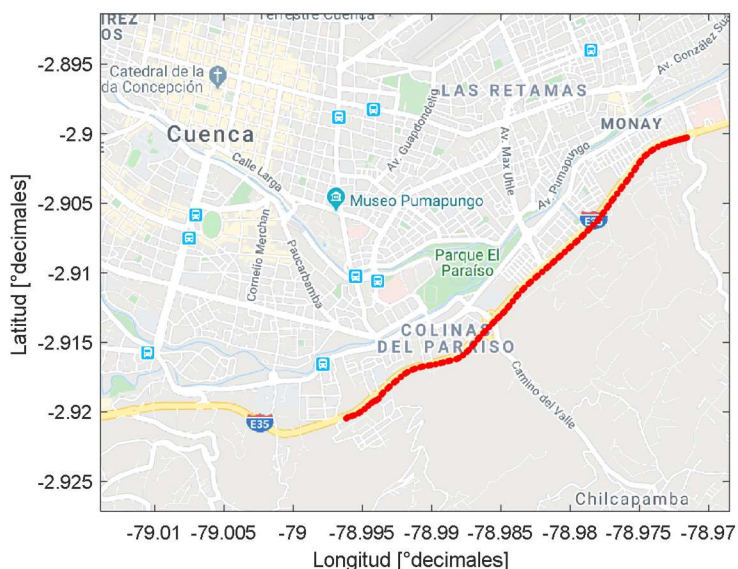
- Ruta en autopista.
- Ruta en un entorno urbano.
- Ruta en un entorno en carretera, fuera de la zona urbana.

Con la ruta en autopista, es decir a una velocidad que no es muy variable, se puede conocer como este comportamiento de velocidad actúa sobre el voltaje de las celdas. Con la ruta en un entorno urbano se podrá averiguar la forma en la cual, las celdas se cargan o descargan dependiendo de la intensidad de frenado o aceleración, al circular por los distintos cruces, semáforos o cantidad de tráfico presente. Con la ruta en un entorno de carretera, se pretende conocer cómo actúan los módulos del banco de baterías durante un viaje de largas distancias, donde se pueden presentar colinas o descensos más pronunciados durante el trayecto.

Con los datos extraídos y algunos análisis de por medio se podrá estimar el ciclo de vida típico del banco de baterías.

### **3.3.1 Pruebas en una ruta en autopista.**

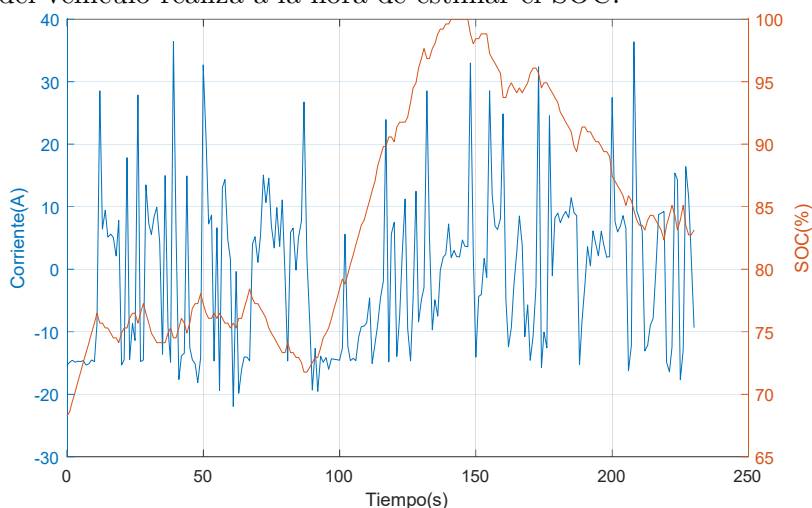
El tramo de autopista recorrido es de 3.9 Km en la ciudad de Cuenca, con la velocidad promedio de 80 km/h y se muestra en la Figura 3.16.



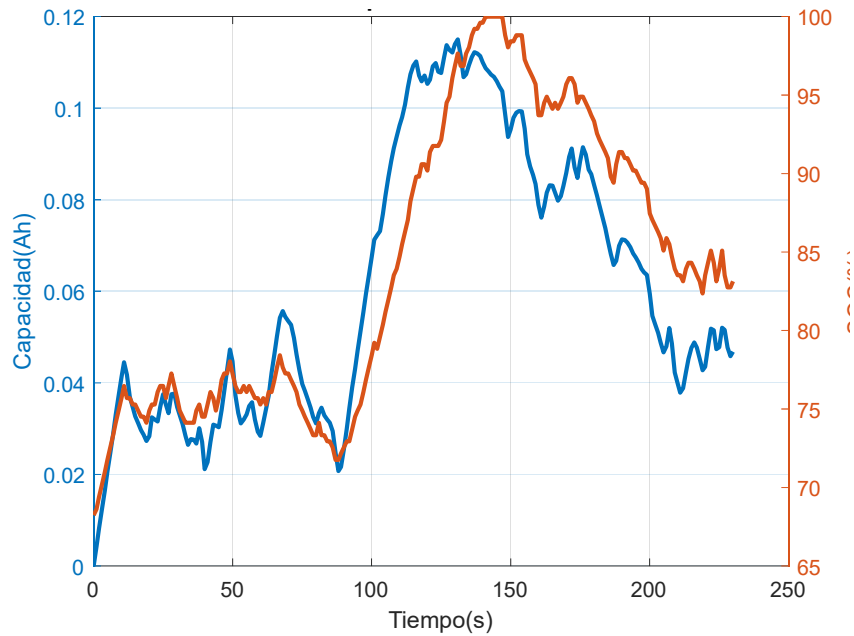
**Figura 3.16** Recorrido realizado para la ruta en autopista

Para analizar el comportamiento del vehículo una primera gráfica de la corriente entregada por el paquete de baterías contra el valor del SOC es de gran ayuda. Analizando la Figura 3.17 se puede observar la relación que tienen estas 2 variables, cuando el valor del SOC se reduce, implica que se produjo un pico de corriente creciente de valor positivo, es decir la batería entregó energía al inversor para que este a su vez alimente al motor eléctrico. Si el valor del SOC aumenta, está asociado a un decremento en el valor de corriente hasta llegar a valores negativos, esto significa que un pulso de corriente ingresa al paquete de baterías procedente del inversor, esta energía como se comentó en puntos anteriores es producida por el motor IC que alimenta al inversor y este a su vez al paquete de baterías.

Al realizar un proceso de integración numérica (método del trapecio) de la corriente total en el tiempo, se obtiene la capacidad de la batería en Amperios-Hora (Ah), analizando esta gráfica (Figura 3.18) contra el SOC, las dos variables siguen una misma tendencia, esto indica una relación lineal que la ECU del vehículo realiza a la hora de estimar el SOC.

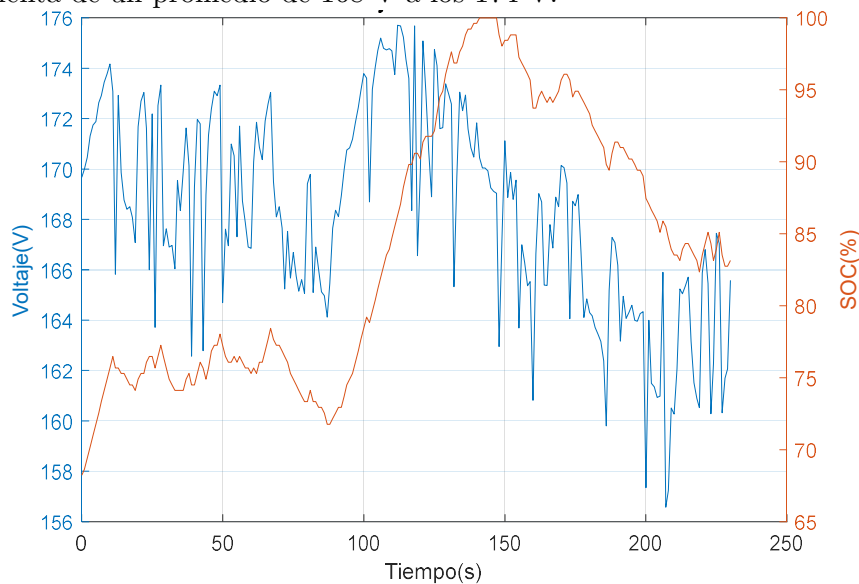


**Figura 3.17** Datos de corriente y SOC tomados en la ruta de autopista



**Figura 3.18 Relación entre capacidad (Ah) y SOC del banco de baterías en la ruta en autopista**

El incremento en el SOC va de la mano con el incremento de voltaje de las celdas de la batería, a mayor voltaje del paquete, implica un porcentaje mayor del SOC. Este comportamiento se puede evidenciar en la Figura 3.19 cuando el SOC crece de valores alrededor de los 75% al 90% y el voltaje se incrementa de un promedio de 168 V a los 174 V.



**Figura 3.19 Datos de voltaje y SOC tomados en la ruta de autopista**

En la Figura 3.20 al comparar la velocidad del vehículo en la ruta con el estado de carga, cuando el vehículo disminuyó la velocidad promedio de 80 km/h a un promedio de 40 Km/h, el SOC aumento de los 72% hasta los 100%, y luego comienza un proceso de descarga de la batería hasta

el final del tramo, esto implica la participación en la tracción del motor eléctrico, cuando el vehículo circula a velocidades menores a los 50 km/h. Al inicio del tramo como la velocidad estaba más alta ( $\sim 80$  km/h) el SOC se mantenía alrededor de los  $75\% \pm 3\%$  es decir el motor eléctrico no consumía energía del paquete de baterías, de lo que se puede intuir que no se encontraba en funcionamiento.

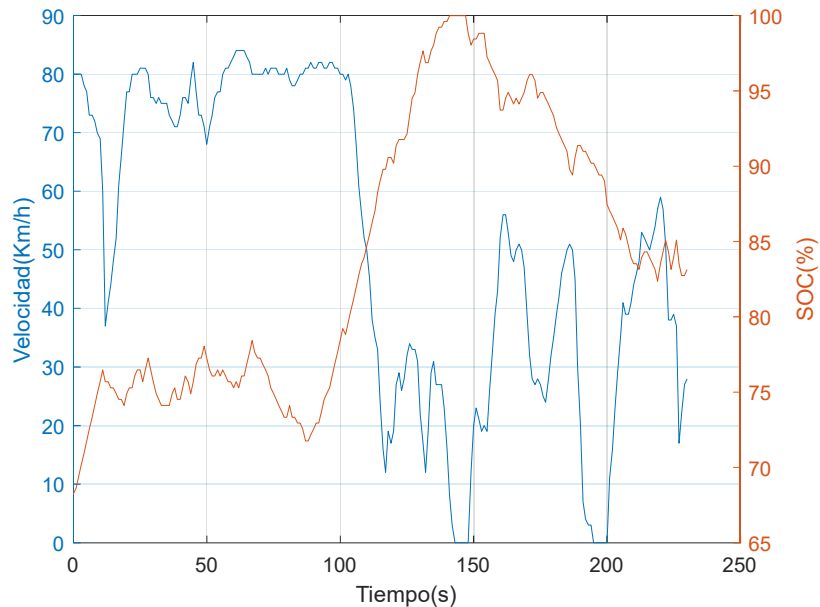


Figura 3.20 Datos de velocidad y SOC tomados en la ruta de autopista

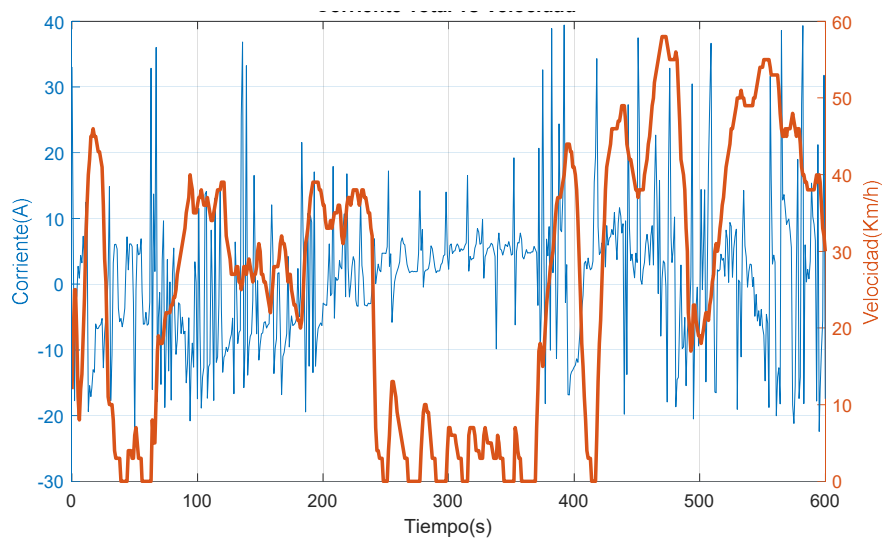
### 3.3.2 Pruebas en una ruta urbana.

El perfil de conducción en un ambiente urbano como se debe suponer, implica una amplia variación en la velocidad, con velocidades nulas en semáforos o cruces, hasta máximos de 50 Km en avenidas o calles sin tráfico. Este comportamiento hace que la corriente presente varios picos tanto crecientes como decrecientes (carga o descarga). En la Figura 3.21 se muestra la ruta seguida dentro del centro urbano de la Ciudad de Cuenca.





**Figura 3.21** Recorrido realizado para la ruta en el centro urbano

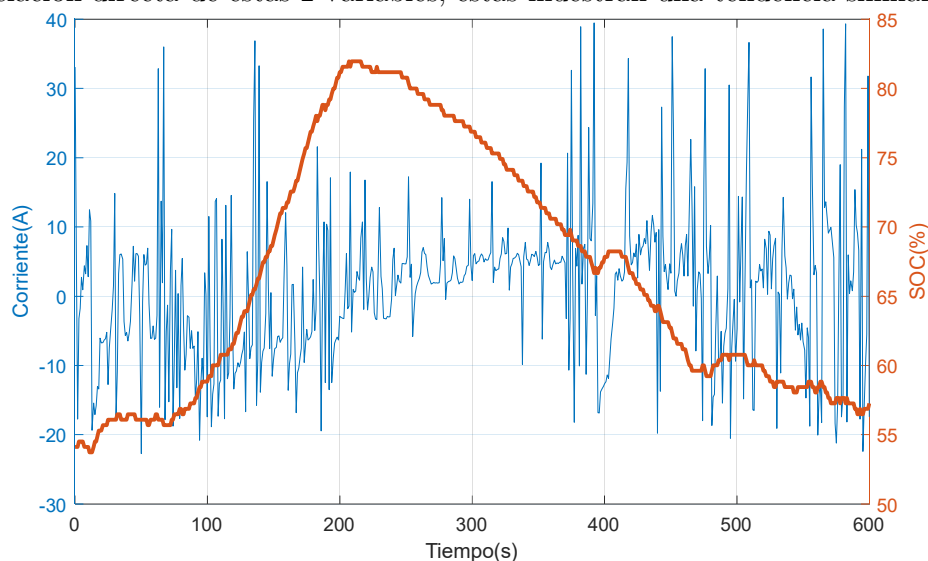


**Figura 3.22** Datos de corriente del paquete de baterías y velocidad del vehículo tomados en un ambiente urbano

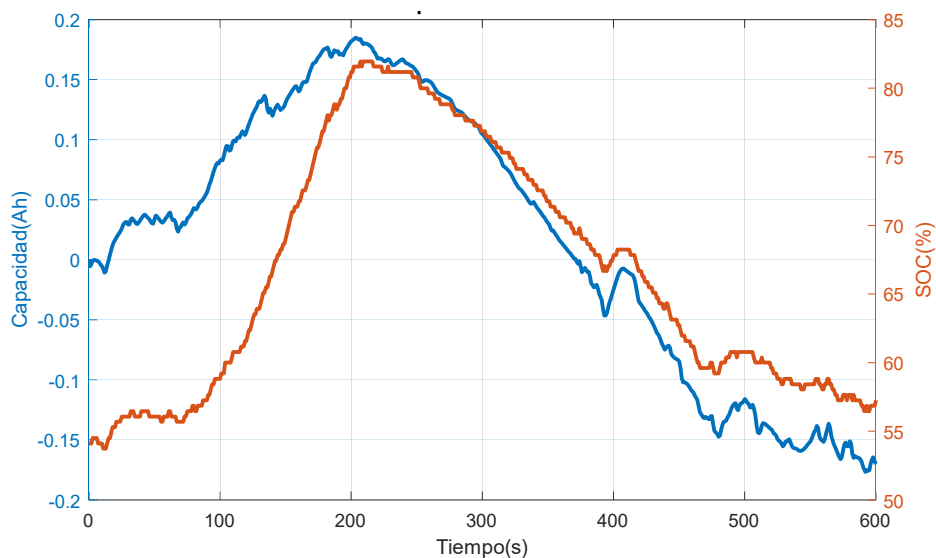
En la Figura 3.22 se puede observar como la velocidad varía desde los 0 km/h hasta los 60 Km/h, en el momento que se tiene una velocidad ascendente, es decir una aceleración del vehículo, la corriente presenta picos crecientes que llegan hasta los 40 A de corriente entregada por el paquete de baterías. Luego cuando la velocidad va en decremento es decir se produce una reducción de velocidad con la ayuda del freno, la corriente presenta picos mínimos decrecientes (-25 A), se deduce que es la energía proveniente del frenado regenerativo que alimenta el paquete de baterías. Todo esto se puede deducir también de la Figura 3.23, si en un tiempo determinado la corriente promedio estuvo en un valor positivo, el SOC se verá disminuido (estado de consumo de energía), si en un tiempo determinado la corriente promedio estuvo en un valor negativo, el SOC por el contrario se verá incrementado (estado de almacenamiento de energía). Para ver la relación de



mejor manera se procede a integrar numéricamente los datos de corriente obteniendo la capacidad en Ah y compararlos con el SOC, como se muestra en la Figura 3.24. Nuevamente se puede entender la relación directa de estas 2 variables, estas muestran una tendencia similar.

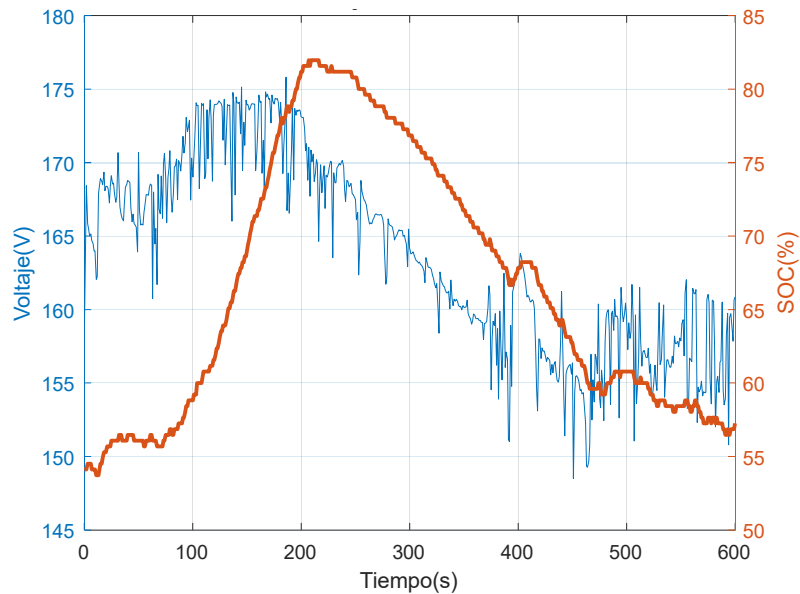


**Figura 3.23** Datos de corriente del paquete de baterías y SOC tomados en un ambiente urbano



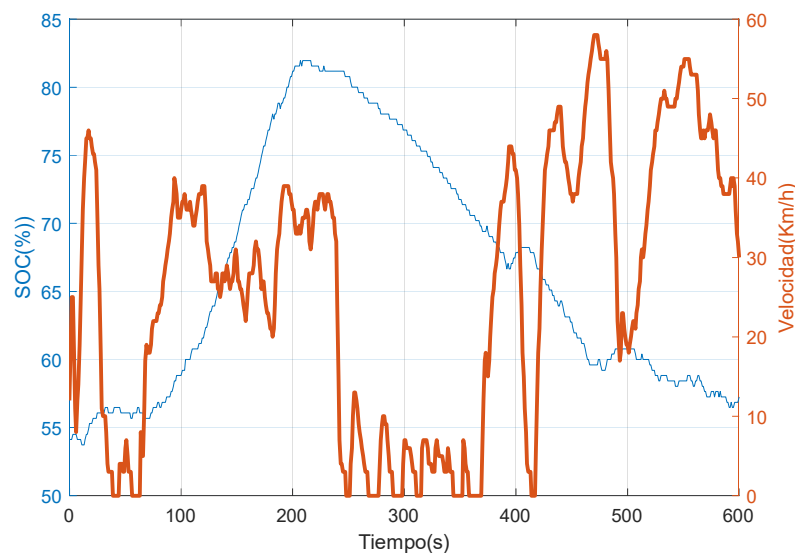
**Figura 3.24** Relación entre Capacidad y SOC del banco de baterías para la ruta urbana

En cuanto, al comportamiento del voltaje, este obedece el patrón del SOC, cuando el SOC presenta una disminución, el voltaje total y por ende el voltaje de cada celda individual también decrece. De igual manera cuando el SOC incrementa, el voltaje nominal del paquete también presenta un aumento, este patrón se muestra en la Figura 3.25 de la medición realizada.

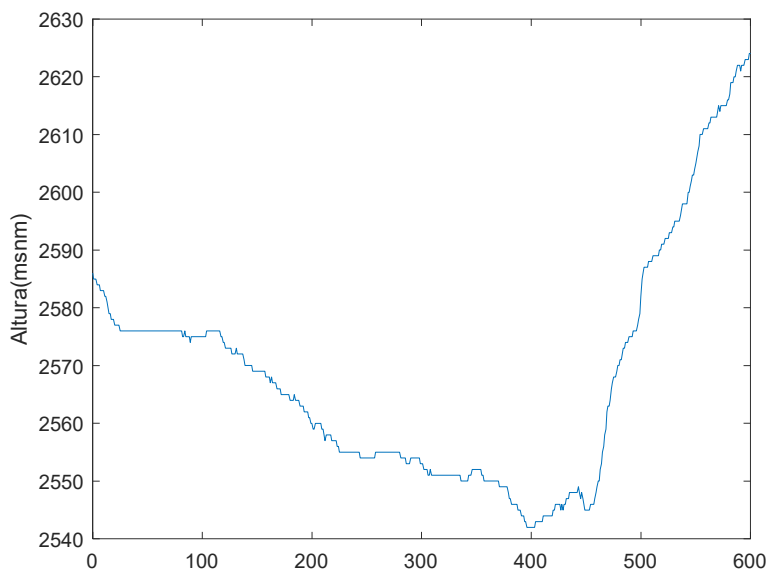


**Figura 3.25** Datos de voltaje del paquete de baterías y SOC tomados en un ambiente urbano

En la Figura 3.26 se puede observar si la velocidad es menor a los 20 Km/h, como en una zona urbana con mayor densidad, que implica más detenciones y arranques (semáforos y alto tráfico), el motor eléctrico funciona más seguidamente y el valor del SOC decrece (de la muestra 250 a la 350). Al inicio de las muestras el SOC aumentó (~ 80%), debido a que le vehículo se mantuvo alrededor de los 30 km/h, y el perfil de altura de la ruta (Figura 3.27) fue en descenso, lo que se supone que el proceso de frenado regenerativo aportó con la carga del banco de baterías. Para la parte final del trayecto el perfil de altura en subida en la ruta junto con las aceleraciones para alcanzar con los 60-50Km/h en ocasiones provocó la disminución del SOC.



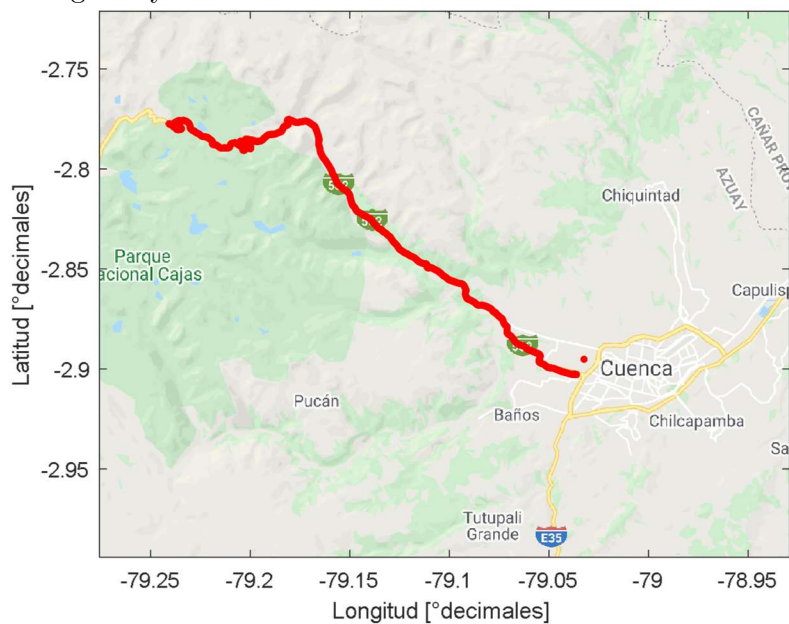
**Figura 3.26** Datos de SOC y velocidad tomados en un ambiente urbano



**Figura 3.27** Perfil de altura del trayecto seguido para la ruta en el ambiente urbano.

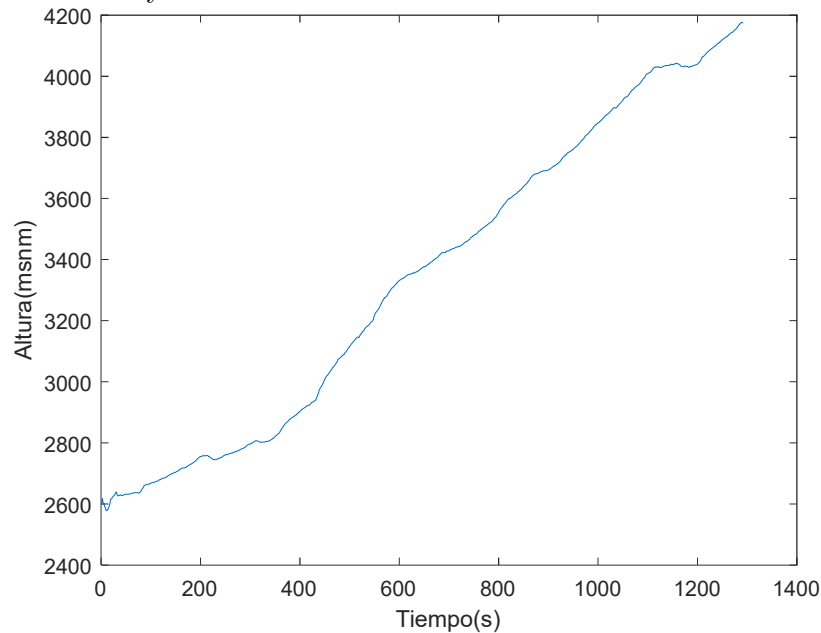
### 3.3.3 Pruebas en una ruta en carretera

La ruta seguida para este entorno, comenzó a las afueras del centro urbano de la ciudad de Cuenca, con rumbo al Parque Nacional el Cajas, al mirador denominado “Tres cruces”. En Figura 3.28 se muestra la ruta seguida y de donde se realizó el análisis de los datos obtenidos.



**Figura 3.28** Recorrido realizado para la ruta en carretera

El recorrido realizado constó de 2 tramos uno de subida al punto de llegada (“Tres cruces”) y otro de bajada, con un total de 68.7 Km de recorrido, a una velocidad promedio de 60 Km/h, el perfil de altura se muestra en la Figura 3.29. Como se puede esperar en el tramo de subida, al no haber una aplicación del freno, la batería no puede aprovechar la energía del frenado regenerativo. Para el tramo de bajada, por el contrario, se usa el freno con más frecuencia, es decir el valor del SOC se verá incrementado la mayoría del recorrido.



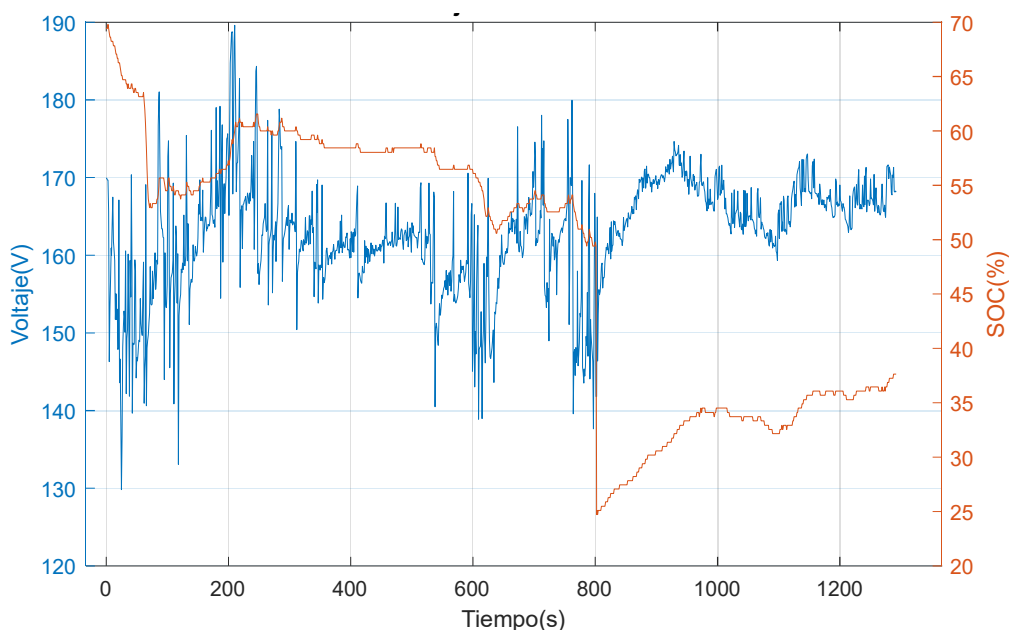
**Figura 3.29 Perfil de altura del recorrido**

### 3.3.3.1 Ruta de ida (subida)

En esta ruta, el valor del SOC se mantiene decreciendo constantemente hasta el valor mínimo permitido, luego comienza a subir tomando parte de la energía del motor IC, o aprovechando los tramos pequeños en los que se produzca el frenado regenerativo. Al igual que el resto de pruebas el valor del voltaje se mantiene acorde al porcentaje de SOC, como se presenta en la Figura 3.30. Lo importante a notar, es como en cierto punto el valor del SOC presenta una caída en su valor exagerada, de una muestra a otra, desde el 50% hasta un 25%. En ese mismo punto al observar los datos del monitoreo de los 10 módulos se presenta la mayor diferencia de voltaje entre módulos, específicamente una diferencia de 2.25 V entre el módulo 10 con 14.65 V y el módulo 6 con 12.40 V. La caída drástica en el porcentaje de SOC en este caso se debió a que la celda 6 con el menor voltaje no pudo ser balanceada por el BMS, en dos muestras anteriores el valor de voltaje bajó de los 15,96 V a los 12,64 V y luego bajando más a los 12.40, donde se produce el salto en el valor del SOC, esto se puede evidenciar en la Tabla 3.3, que es una porción de los datos capturados durante el trayecto.

**Tabla 3.3 Extracto de los datos obtenidos para la ruta en carretera**

VB01	VB02	VB03	VB04	VB05	VB06	VB07	VB08	VB09	VB10	Diferencia entre máximo y mínimo
16,38	16,28	16,23	15,89	16,38	15,96	15,79	15,99	16,04	16,31	0,59
14,43	14,45	14,40	14,40	14,48	12,64	13,57	14,43	14,38	14,55	1,91
14,60	14,60	14,40	14,33	14,43	12,40	13,47	14,38	14,45	14,65	2,25
16,72	16,58	16,67	16,18	16,76	16,38	16,18	16,31	16,38	16,67	0,58
14,91	14,87	14,79	14,62	14,88	13,74	14,11	14,69	14,72	14,96	1,22
15,48	15,43	15,28	15,06	15,48	14,89	14,89	15,23	15,18	15,45	0,59

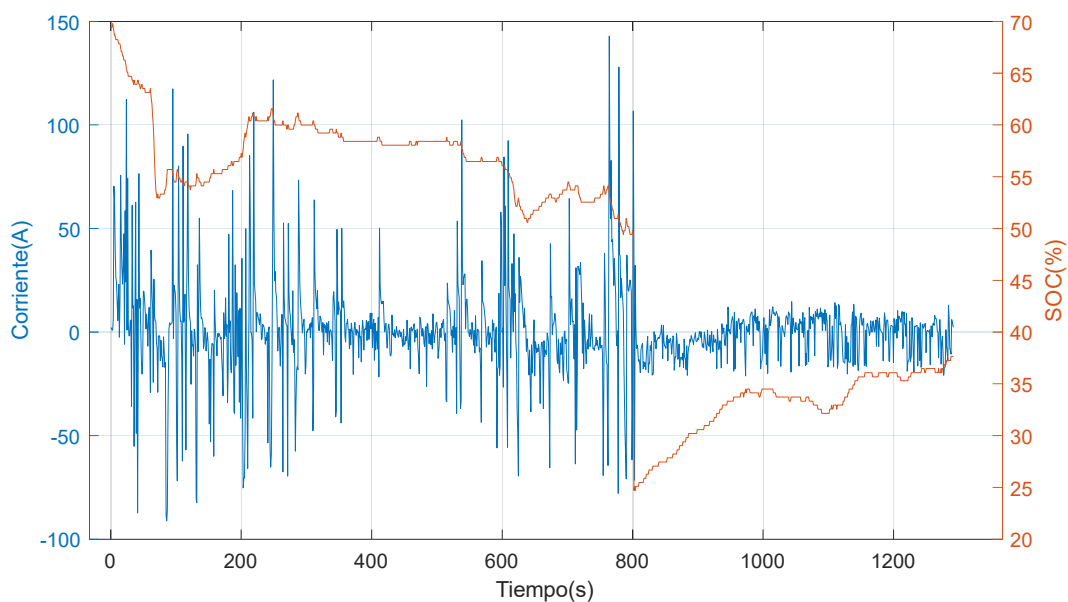


**Figura 3.30 Datos de voltaje total y SOC tomados de la ruta en carretera (tramo de ida)**

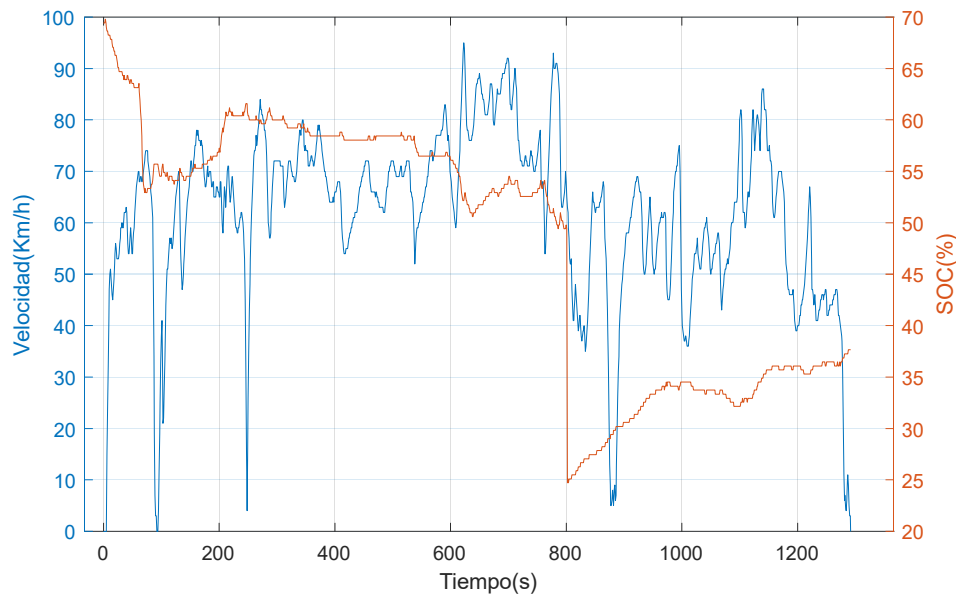
Como se evidenció en las pruebas anteriores la ECU estima el valor del SOC mediante la capacidad en Ah de las celdas después de realizar una integración con los datos de corriente. El voltaje solo sigue la tendencia del nivel del SOC, como en una batería común, cuando esta presenta niveles altos de carga, el voltaje también presentará niveles nominales altos, por el contrario, cuando el SOC es bajo el voltaje también presentará valores nominales mínimos. En la Figura 3.30 el punto donde cae drásticamente el SOC, como se debería esperar el nivel del voltaje también debió haberse reducido a niveles mínimos permitidos, sin embargo los voltajes siguen manteniéndose en valores normales, esto nos lleva a pensar que la ECU registra este valor del SOC de forma que la alimentación proveniente del banco de baterías se suspenda por momento hasta que el módulo 6

se recupere del valor mínimo (12.40 V con 2.25 V de diferencia en relación al resto de módulos, Tabla 3.3), lo que indica un nivel bajo de SOC solo del módulo 6. La suspensión de la alimentación también se puede evidenciar de la Figura 3.31, donde se muestra la clara disminución en los rangos de operación de la corriente total, después de presentarse el salto en el nivel de SOC. Este salto drástico evidencia la poca retención de energía del módulo 6 y sumado a la dificultad que tuvo la BMS en igualar la carga del módulo en 3 instantes de tiempo, hacen que la ECU registre el nivel crítico mínimo del SOC, desactivando momentáneamente la alimentación por parte del banco de baterías y generando el código de error en el tablero del vehículo.

En cuanto a la corriente en este tramo de la ruta de igual forma está ligada al valor del SOC, como en el resto de rutas, si el SOC crece, se produce un pico descendente de corriente y si el SOC decrece se produce un pico ascendente. La Figura 3.31 muestra a la corriente y el estado de carga, de ella se puede obtener una aproximación a los máximos y mínimos de corriente que se producen en una ruta de estas características. Después de la bajada drástica del SOC es importante notar como la corriente ya no presenta picos máximos o mínimos de gran magnitud, no supera los  $\pm 20$  A, esto indica una reducción en el porcentaje de participación del motor eléctrico durante la tracción del vehículo para la parte final del tramo, producto de que la ECU desactiva el funcionamiento del banco de baterías después de presentarse el código de error en el tablero junto a la caída drástica en el SOC.



**Figura 3.31** Datos de corriente total y SOC tomados de la ruta en carretera (tramo de ida)

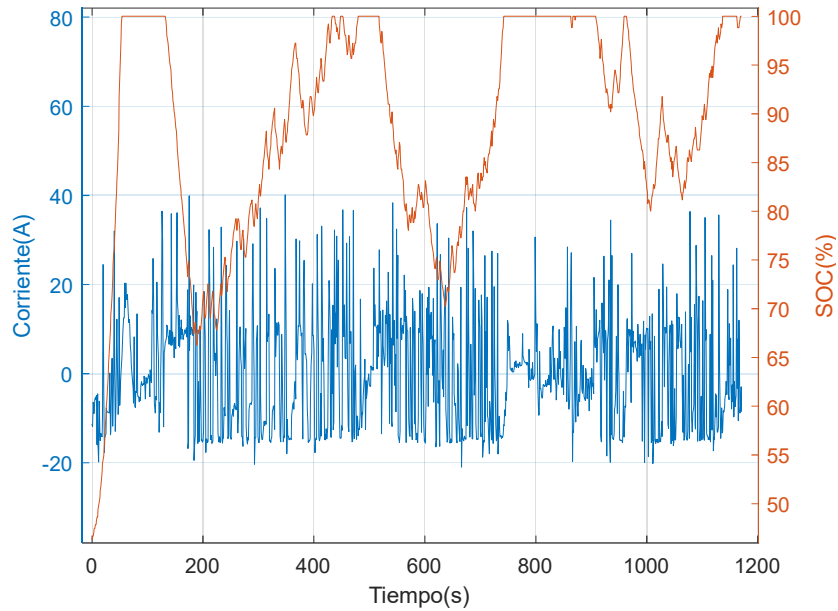


**Figura 3.32 Datos de velocidad y SOC tomados de la ruta en carretera (tramo de ida)**

De la Figura 3.32, la velocidad en el tramo se mantuvo en un promedio de 60 km/h, como el freno no se utilizó en la mayoría del tramo, el SOC se mantuvo decreciendo y luego cuando se presentó la drástica caída en el SOC ( $\sim 25\%$ ), la ECU desactiva el sistema híbrido y el motor de IC se encarga por completo de la tracción, después de eliminar dicho código con la aplicación móvil el funcionamiento del sistema híbrido se reanuda y el banco de baterías aprovecha la energía del motor IC para cargar el banco de baterías al final del tramo (en especial al módulo 6). La experiencia de manejo presentada cuando el SOC se vio reducido de un instante al otro fue una pérdida de potencia y de velocidad, como si el vehículo no tuviera la fuerza de tracción suficiente como para mantener el ritmo de velocidad que se llevaba, esto se debe a que el motor eléctrico ya no aporta nada de tracción, hasta que, se recupere del nivel crítico de SOC, cargando su banco de baterías y apoyando a la tracción del vehículo nuevamente.

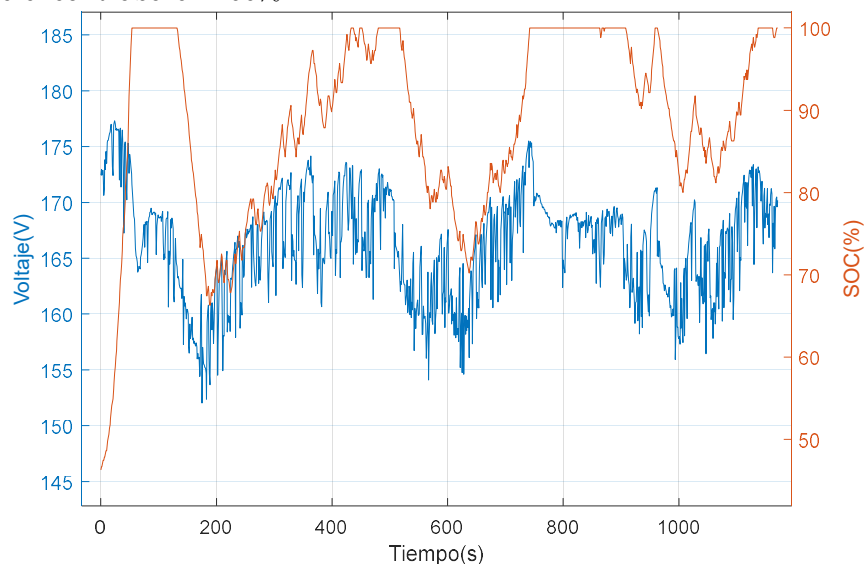
### 3.3.3.2 Ruta de vuelta (bajada)

En la ruta de bajada, la velocidad promedio aumenta y la aplicación del freno en el trayecto es más seguido, es decir existe una mayor energía de frenado regenerativo que es aprovechada por el banco de baterías. La Figura 3.33 muestra al SOC mantenerse sobre el 70%, incluso llegando al 100% en ciertos tramos del trayecto. La corriente se mantiene dentro de rangos reducidos, en comparación con el resto de pruebas realizadas, no sube de pulsos de 40 A y no baja menos de los -20 A, esto indica que la participación del motor eléctrico en la tracción es reducida.



**Figura 3.33 Datos de corriente total y SOC tomados de la ruta en carretera(bajada)**

El voltaje del banco no presentó anomalías en esta ruta, todos los módulos se mantuvieron equilibrados por la BMS, en un valor promedio de 16,628 V y una máxima diferencia entre el módulo de mayor voltaje con el menor de 0.61 V. El comportamiento registrado se muestra en la Figura 3.34, es importante notar que el voltaje del paquete de baterías no superó los 175 V a pesar de que el SOC se encontraba en 100%.



**Figura 3.34 Datos de voltaje total y SOC tomados de la ruta en carretera(bajada)**

La Figura 3.35 muestra la velocidad promedio sobre los 70 Km/h, al tratarse de una ruta en bajada implica un consumo de energía del banco de baterías reducido, permitiendo que el valor del SOC llegue a valores elevados.



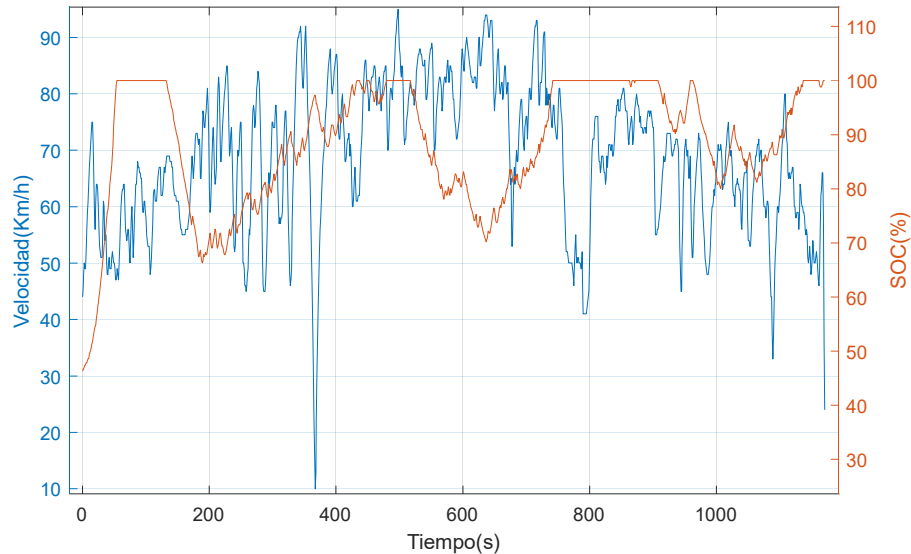


Figura 3.35 Datos de velocidad y SOC tomados de la ruta en carretera(bajada)

### 3.3.4 Estimación del ciclo de vida

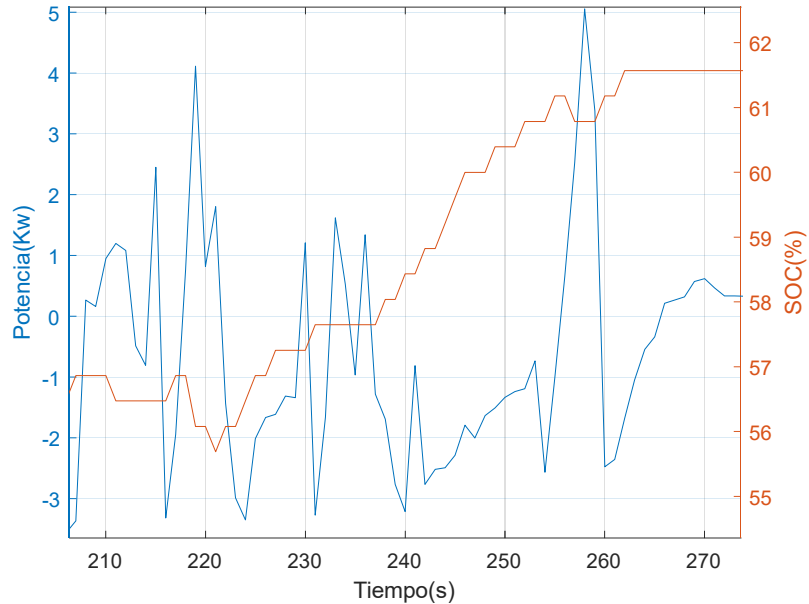
La ruta más crítica de todas, es en el centro urbano. La participación del motor eléctrico en la tracción del vehículo es la más elevada, y provoca que las baterías tengan que entregar o recibir energía en el movimiento de forma más reiterada, presentando más ciclos de carga o descarga. En otras palabras, la ruta urbana, es la que presenta más detenciones y arranques del vehículo y donde se ve más comprometido el funcionamiento de la batería. Dentro de los datos técnicos de la batería original, el consumo de combustible combinado estima un 66.6% de conducción en la ciudad y un 33.3% en carretera [66]. Para realizar el cálculo del ciclo de vida de la batería en función de kilómetros de recorrido y comparar con el nuevo banco de baterías, se imponen los siguientes porcentajes de circulación en los 3 entornos de conducción, que serán tomados en cuenta una vez se obtenga el kilometraje para cada ruta, otorgando un mayor peso a la ruta urbana.

Recorrido en centro urbano: 60% de circulación.

Recorrido en Autopista: 15% de circulación.

Recorrido en Carretera: 25% de circulación.

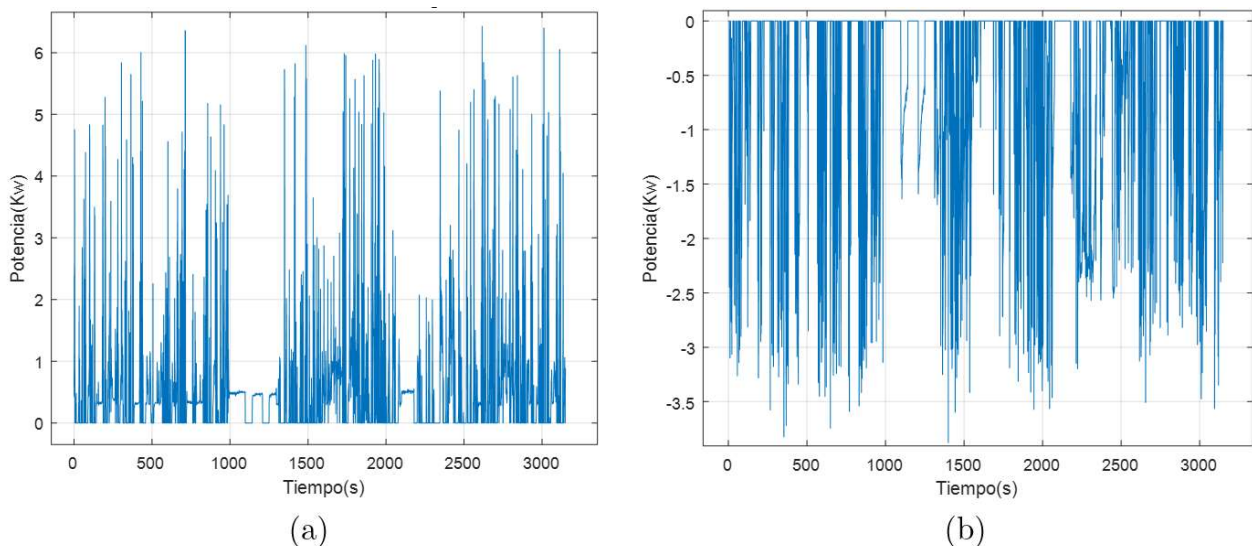
El proceso para realizarla la estimación que se usó fue calcular la potencia entregada o recibida en la batería (a partir de la corriente total y el voltaje del paquete de baterías), entonces se obtiene un grafica de potencia vs tiempo.



**Figura 3.36 Variación de la Potencia en la ruta urbana**

La grafica de potencia (Figura 3.36) se la puede analizar al igual que las de corriente, un promedio negativo de potencia en un intervalo de tiempo implica una ganancia de energía que carga la batería y el SOC incrementa, y un promedio positivo de potencia es un consumo de energía del paquete de baterías.

Se continua con la separación de los valores de potencia positiva durante la descarga y la potencia negativa durante la carga, a partir de los datos de potencia anteriormente obtenidos, como se muestra en la Figura 3.37.



**Figura 3.37 (a) Potencia durante la descarga en la ruta urbana (b) Potencia durante la carga en la ruta urbana**



Si se integran estas graficas con respecto al tiempo en las que fueron tomadas, se obtiene como resultado la energía en unidades de kW<sub>s</sub> (kilo-watts segundo), tanto consumida por el motor (positiva) como usada en la recarga del paquete de baterías(negativa). Los resultados de realizar la operación, mediante el método numérico de integración trapezoidal en Matlab dan como resultado [64]:

$$E_{descarga} = 1915.426 \text{ kW}_s = 0.53206 \text{ kWh}$$

$$E_{carga} = -1987.562 \text{ kW}_s = -0.5521 \text{ kWh}$$

$$Distancia = 15.4226 \text{ Km}$$

Este cálculo fue realizado para las otras 2 rutas y los resultados se muestran resumidos en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Resultados de energía consumida y almacenada por el vehículo en las 3 rutas bajo análisis**

	Centro Urbano	Autopista	Carretera
<b>E<sub>descarga</sub></b>	0.53206 kWh	0.0524 kWh	0.65379 kWh
<b>E<sub>carga</sub></b>	-0.5521 kWh	-0.06227 kWh	-0.686 kWh
<b>Distancia</b>	15.4226 km	5.539 km	68.747 km
<b>Consumo promedio en descarga</b>	0.034499 kWh/Km	0.00946 kWh/Km	0.00951 kWh/Km

Se puede destacar como la energía consumida en el centro urbano es mayor que el resto de rutas en relación a la distancia de recorrido, un indicador adicional para tratarla como la ruta crítica.

De la Figura 3.1, se sabe los siguientes datos respecto al sistema de almacenamiento original del vehículo:

$$Ciclo \ de \ vida = 3000$$

$$Capacidad = 6.5 \text{ Ah}$$

$$Voltaje \ total = 144 \text{ V}$$

$$Energia \ total = 6.5 * 144 = 936 \text{ Wh} = 0.936 \text{ kWh}$$

Al realizar la división de la energía total que la batería puede entregar en 1 ciclo (0.936 kWh) para el consumo promedio en descarga, se obtiene la cantidad de kilómetros que se pueden recorrer

hasta que la energía total se iguale a la energía consumida en descarga, es decir un ciclo de descarga se haya completado.

$$d_{urbano} = \frac{0.936 \text{ kWh}}{0.034499 \text{ kWh/Km}} = 27.1312 \text{ Km/ciclo}$$

Multiplicando el valor de la distancia en kilómetros hasta completar 1 ciclo de descarga por el ciclo de vida de la batería original, se obtiene el resultado estimado del ciclo de vida de la batería en función de kilómetros de recorrido en la ruta bajo consideración.

$$D_{urbano} = 27.1312 \frac{\text{km}}{\text{ciclo}} * 3000 \text{ ciclo} = 81393.663 \text{ Km}$$

Un cálculo similar con las 2 rutas adicionales se muestra en la Tabla 3.5

**Tabla 3.5 Vida útil en diferentes entornos**

	<b>Centro Urbano</b>	<b>Autopista</b>	<b>Carretera</b>
<b>Vida útil</b>	81393.663 Km	296828.752 Km	295268.138 Km

Finalmente, considerando los porcentajes de circulación en las distintas rutas bajo estudio se obtiene un resultado final para el ciclo de vida.

$$D = 60\% D_{urbano} + 25\% D_{carretera} + 15\% D_{autopista}$$

$$D = 48836.198 + 73817.034 + 44524.312 = 167177.546 \text{ Km}$$

Según la compañía Toyota, cuando un usuario compra un vehículo híbrido de la serie Prius, este viene con una garantía de recorrido para su batería híbrida de 160000 km o de 8 años [65]. Sin embargo, también indica que esta duración está ligada exclusivamente en los hábitos y ambientes de conducción por donde el usuario conduzca el vehículo a lo largo de su vida útil. El resultado práctico obtenido de 167000 se aproxima al valor inicial de garantía.

### 3.3.5 Condiciones típicas de operación, máximo y mínimo voltaje, corriente, y SOC

A partir de todos los datos y gráficas obtenidas mediante las rutas del punto anterior, se puso a prueba el vehículo en distintas condiciones de operación, que un usuario común puede requerir en su día a día y para distintas circunstancias. De todos los resultados se puede concluir lo siguiente:



- El valor del voltaje de las celdas depende del nivel de SOC que se presente en el instante de una medición, mayor es su valor si mayor es el nivel del SOC y viceversa.
- La corriente total con el que se carga o descarga el paquete de baterías, presenta picos ascendentes o descendentes, dependiendo del requerimiento del motor eléctrico, cuando éste entra en funcionamiento para aportar tracción al vehículo se producen picos de corriente positiva de alrededor de los 100 A y cuando se produce el frenado regenerativo que carga las baterías se presentan picos descendentes de alrededor de los -80 A.
- Dependiendo del nivel de velocidad o la ruta que se lleve el SOC tendrá ciertos niveles de operación. Por ejemplo, para la ruta en carretera en el tramo de bajada, el nivel del SOC se mantuvo elevado por la alta participación del frenado regenerativo que constantemente carga a la batería (llegando incluso al 100% de SOC), en el tramo de subida, por el contrario, al no producirse la aplicación del freno, el nivel de SOC no pudo cargarse y se mantuvo decreciendo constantemente hasta llegar a un valor mínimo crítico (~ 25 %), debido al deterioro presentado por los módulo que ya no tiene una buena capacidad de retención de energía. En la ruta urbana es mayor la frecuencia de frenado y por lo general no se circula a velocidades mayores a los 40 Km/h, entonces el valor del SOC varía entre porcentajes del 65% al 40% y no llega a cargarse o descargarse por completo, pero en todo momento el motor eléctrico está en funcionamiento entregando o extrayendo energía del banco de baterías.

Con las conclusiones obtenidas del comportamiento se puede armar un cuadro resumen (Tabla 3.6) de los rangos de operación típicos para voltaje, corriente y SOC, en los distintos ambientes de conducción, y basados en varias pruebas de campo realizadas para cada ruta.

**Tabla 3.6 Rangos de operación típicos de voltaje, corriente y SOC obtenidos de las rutas bajo análisis.**

<b>Ambiente de conducción</b>	<b>Rango de Velocidad (Km/h)</b>	<b>Rango de voltaje de operación</b>	<b>Rango de corriente de operación</b>	<b>Rango de variación del SOC</b>
<b>Autopista</b>	60 - 100	175V a 155V	30A a -20A	100% a 75%
<b>Centro urbano</b>	0 - 50	180 V a 145V	130A a -90A	90% a 40%
<b>Carretera(subida)</b>	30 - 60	180V a 130V	120A a -80A	60% a 30%
<b>Carretera(bajada)</b>	60 - 90	175V a 155V	40A a -20A	100% a 70%

Como se puede ver en la Tabla 3.6 los rangos más amplios de operación, y donde se ve más comprometido el funcionamiento del paquete de baterías es la ruta en el centro urbano, donde implica más detenciones y arranques del vehículo.

### 3.3.6 Identificación del error de la ECU

El problema parte cuando la ECU de administración de energía ilumina el tablero del vehículo con el error que se muestra en la Figura 3.38, el cual dice “CHECK HYBRID SYSTEM, STOP THE VEHICLE IN A SAFE PLACE IMMEDIATELY”

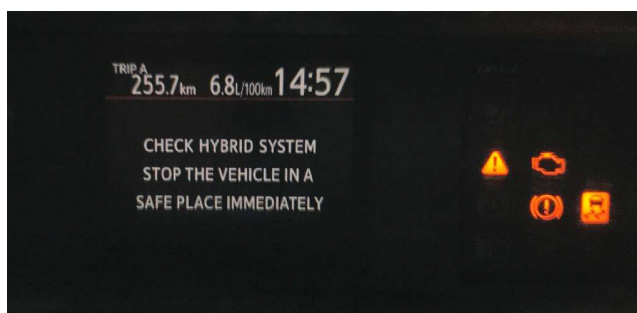


Figura 3.38 Alerta de error en el tablero del vehículo

Este error indica un mal funcionamiento del sistema híbrido del vehículo, para lo cual se realiza un monitoreo mediante un dispositivo OBD2, obteniendo el código de error P0A80 como se muestra en la Figura 3.39. Este código hace referencia a la sustitución completa de la batería del sistema híbrido.

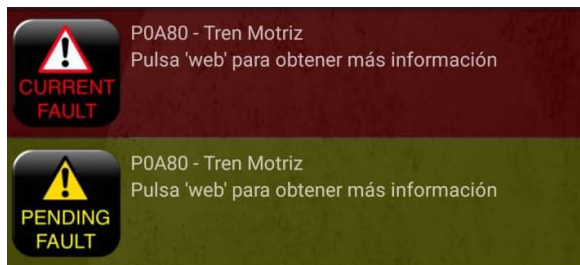
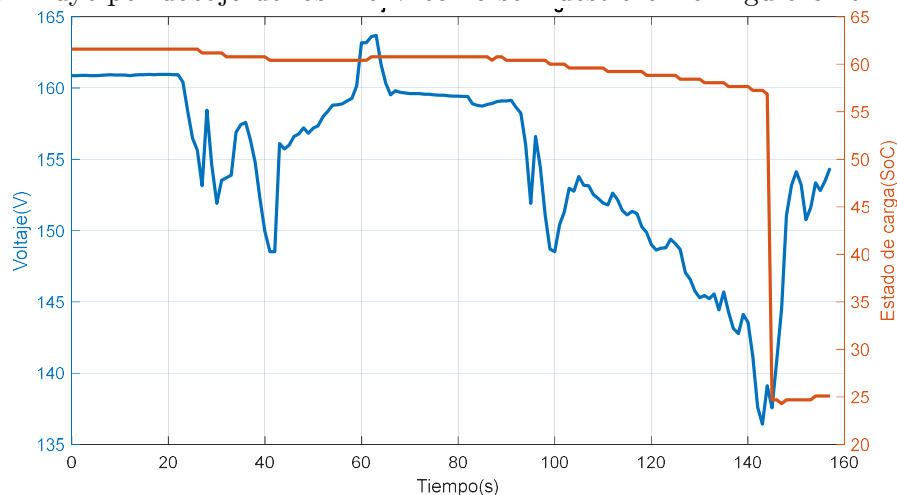


Figura 3.39 Código de error obtenido mediante OBD2

Esto se debe a que el BMS que monitorea el voltaje de los bloques de batería, determina que se ha producido un mal funcionamiento estableciendo dicho código, Mientras no se elimine el código de error mediante el OBD2 la potencia que aporta el sistema eléctrico al conjunto híbrido se encuentra inactiva, lo cual aumenta el consumo de combustible empeorando la eficiencia del vehículo.

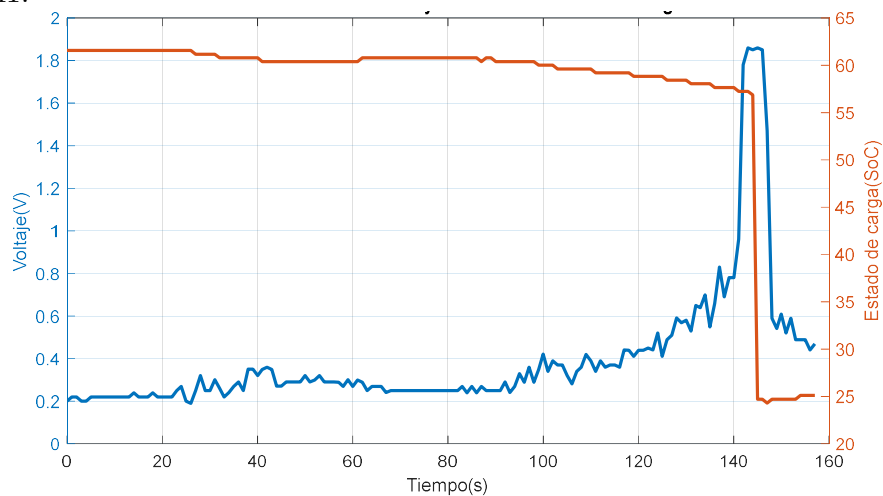
Para identificar los parámetros y umbrales que activan el código de error de la batería se analizan los voltajes de la batería y de cada uno de sus módulos durante algunas pruebas en las cuales se obtenga el código de error. En los registros obtenidos se identifica que al momento que se presenta el código de error el estado de carga (SOC) tiene un salto considerable de  $\sim 60\%$  a  $\sim 25\%$ , lo cual utilizaremos como línea guía para identificar los parámetros que activan el error.

El primer parámetro analizado es el voltaje total de la batería, el cual se mantiene en un rango de 145-180 V en su correcto funcionamiento. En las pruebas que se obtuvieron el código de error, este voltaje disminuye por debajo de los 140 V como se muestra en la Figura 3.40.



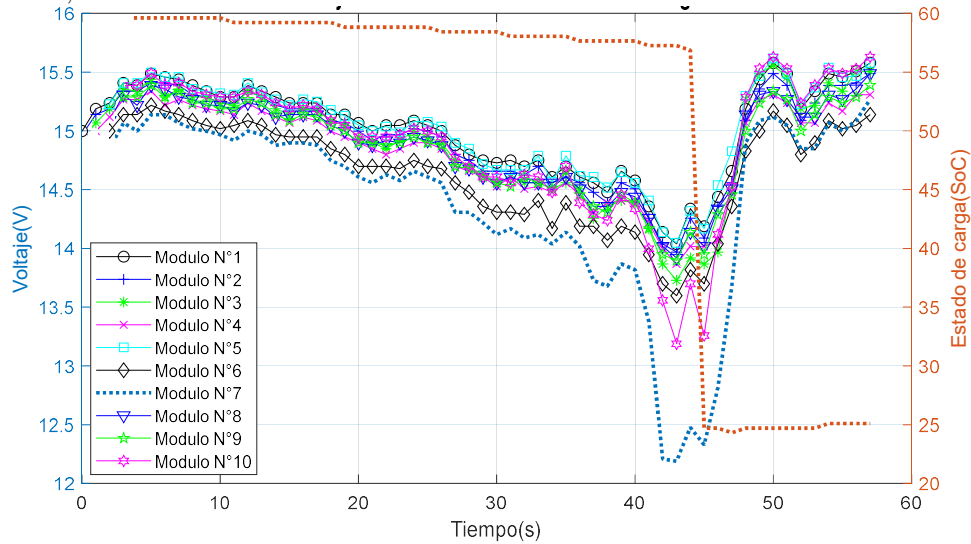
**Figura 3.40 Prueba 1 - Voltaje Total vs Estado de Carga**

El parámetro más significativo es la diferencia de voltaje entre el módulo con máximo voltaje modulo con mínimo voltaje, la cual se mantiene por debajo de los 0,8 V en su correcto funcionamiento. En las pruebas que se obtuvieron el código de error la diferencia de voltaje supera el valor de 0,8 V de umbral llegando hasta un pico de 1,8 V en todos los casos como se muestra en la Figura 3.41.



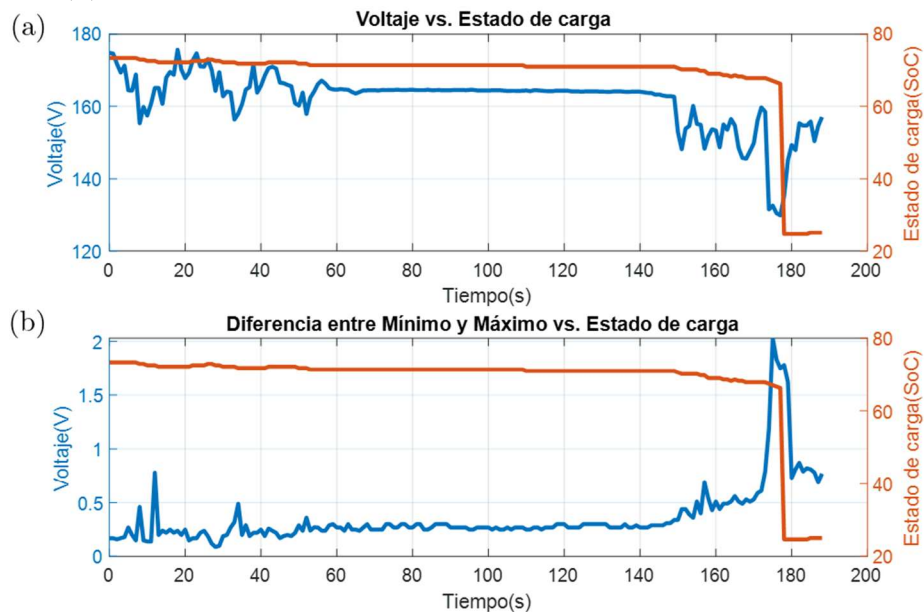
**Figura 3.41 Prueba 1 - Diferencia entre mínimo y máximo vs Estado de Carga**

Para una mejor visualización en la Figura 3.42 se grafica el voltaje de cada uno de los módulos dentro de los últimos 60 segundos donde se activa el código de error, en el cual se idéntica al módulo 7 como defectuoso mostrando un voltaje significativamente inferior a los demás módulos llegando a los 12,2 V.



**Figura 3.42 Prueba 1 - Voltaje de los módulos vs Estado de Carga**

Para analizar cómo se deteriora la batería a medida que pasa el tiempo sin reemplazar las celdas defectuosas, se tomó una segunda prueba 5 meses después de la primera, en la que se puede notar que el voltaje total de la batería se mantiene en el mismo rango de operación, en el cual se obtiene el código de error cuando la batería tiene un voltaje menor a 130 V, y de igual manera una diferencia entre módulos mayor a 0,8 V, en este caso obteniendo un pico -de 2 V como se muestra en la Figura 3.43(b).



**Figura 3.43 (a) Voltaje vs Estado de Carga - Prueba 2 (b) Diferencia entre mínimo y máximo vs Estado de Carga – Prueba 2**



Como se puede ver en la Figura 3.44, ya no existe solo un módulo defectuoso como en la primera prueba, en este caso los módulos 6 y 7 llegan a los 12 V en el momento del error, muy cerca también de los módulos 1, 5 y 10 con valores inferiores a 13 V, lo cual significa que todo el banco de baterías se está deteriorando progresivamente.

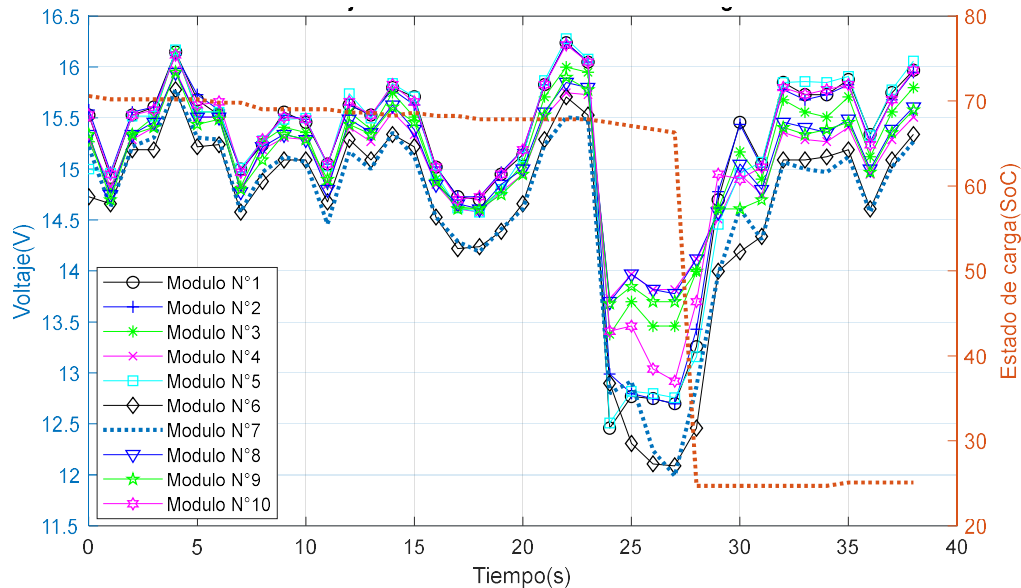


Figura 3.44 Prueba 2 - Voltaje de los módulos vs Estado de Carga

Se tomó una tercera prueba antes de la sustitución, tomada 3 meses después de la segunda prueba, en la cual no existe una variación en cuanto al comportamiento total de la batería, pero se puede notar que en este caso se obtiene una diferencia de voltajes entre módulos mayor a 3 V como se muestra en la Figura 3.45(b).

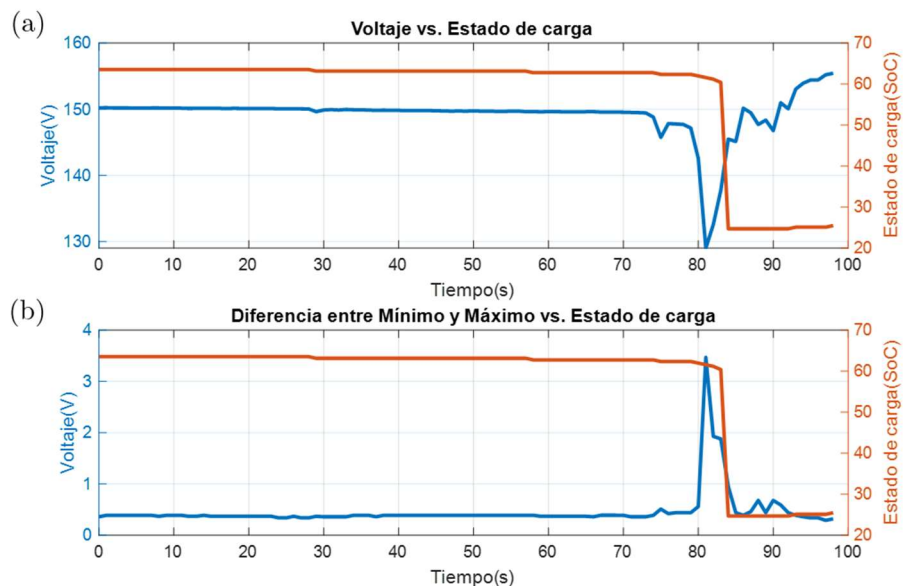


Figura 3.45 (a) Voltaje vs Estado de Carga - Prueba 3 (b) Diferencia entre mínimo y máximo vs Estado de Carga - Prueba 3

En este caso el módulo 6 presenta un mayor deterioro llegando casi a los 10 V, seguido por el módulo 7 que se mantiene con un mínimo de 12 V y el módulo 5 debajo de los 13 V. Los demás módulos se encuentran dentro del rango de operación correcto como se muestra en la Figura 3.46.

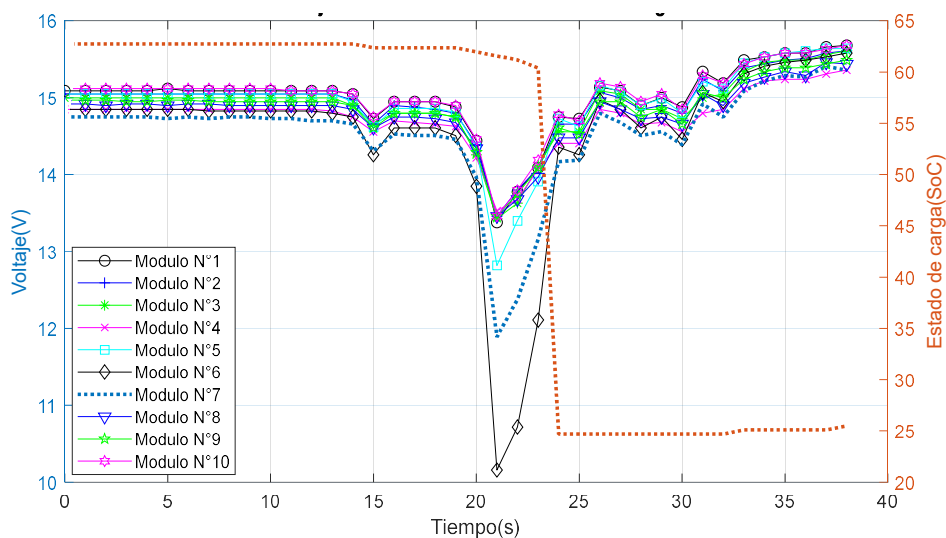


Figura 3.46 Prueba 3 - Voltaje de los módulos vs Estado de Carga



## Capítulo 4: Diseño y Desarrollo Experimental

### 4.1 Resolución del problema y estudio de alternativas disponibles

Como se planteó en los objetivos del trabajo de titulación, la solución que se propone es la suplantación del banco de baterías ante la alerta presentada en el tablero del vehículo, que indica mediante un código de error (DTC) la sustitución del banco de baterías del sistema híbrido. Según el estado del arte y los desarrollos en los últimos años, las baterías de iones de litio cada vez van ganando más protagonismo en su aplicación en los vehículos eléctricos e híbridos, de esta tendencia nueva nació la idea de usar este tipo de tecnología para suplantar al banco original de NiMH (Níquel metal-hidruro), y se planteó la cuestión de por qué Toyota no invierte en el desarrollo de vehículos híbridos con esta tecnología de almacenamiento, la cual ofrece mayores prestaciones en cuanto a densidad energética, voltaje nominal o capacidad de almacenamiento. Uno de los factores que se puede pensar en principio es que, al tratarse de vehículos híbridos, el uso de la batería en ellos no está pensado para trabajar como en los vehículos eléctricos, que la tracción depende exclusivamente de la energía almacenada en la batería, sino más bien son un apoyo en situaciones específicas como en los arranques o a bajas velocidades, con el objetivo de generar un ahorro de combustible por parte del motor IC al estar activo menos tiempo. En principio con la suplantación a la nueva tecnología lo que se pretende obtener es una mayor autonomía de la batería en función de kilómetros de recorrido. Las baterías de Li-ion disponen de una mayor capacidad de almacenamiento, lo cual se traduce en una mayor cantidad de kWh que se pueden consumir hasta completar un ciclo de descarga, lo que implica una mayor distancia de recorrido por ciclo, y al final se traduce en una vida útil aumentada.

Partiendo de esto, hay varias características que se deben tener en cuenta al seleccionar la batería más adecuada para un vehículo. La característica más significativa es su vida útil que se determina por el número de ciclos de carga en los cuales la batería mantiene un 80% de su capacidad. Además, la energía específica (Wh/kg), potencia específica (W/kg) y densidad de energía (Wh/l).

Las baterías de Li-ion pueden ser de múltiples familias como son litio óxido de cobalto (LCO), litio titanio (LTO), litio níquel manganeso cobalto (NCM), níquel de litio aluminio cobalto (NCA), óxido de litio manganeso (LMO), litio hierro fosfato (LFP), cada uno de los cuales tiene características diferentes y por lo tanto diferentes ventajas y desventajas analizadas en el estado del arte. Cada una de las características de los distintos tipos de baterías de Li-ion se muestran desde la Tabla 2.2 hasta la Tabla 2.7.



#### 4.1.1 Elección de la nueva tecnología

A partir de las familias de baterías de Li-ion y con el conocimiento sobre el comportamiento del banco de baterías original de NiMH, en cuanto a los picos de voltaje y corriente en descarga y carga, se propone usar celdas de Li-ion que cumplan estos requerimientos dentro de las múltiples familias, de tal forma que cada celda soporte dichos picos de corriente y que conectadas en serie igualen a los voltajes nominales de cada módulo (14,4 V) , y soporten voltajes mínimo y máximos de cada módulo dentro de los 10 que conforman el banco original de fábrica.

Para la elección de la tecnología dentro de las baterías de Li-ion, una de las variables que se toma en consideración es el ciclo de vida que ofrece, según el estado del arte investigado (Tabla 2.2 a Tabla 2.7), las celdas de LFP y LTO presentan los mayores valores para esta característica. Otro factor que permite escoger entre las distintas opciones, es la disponibilidad y costo en el mercado, las opciones analizadas fueron LFP y NMC (consultado en varios sitios online de venta de baterías). La tecnología LTO son las de más alto precio y al momento de la consulta en el mercado, la única presentación disponible es en forma cilíndrica.

Finalmente, para el trabajo experimental se escogió la tecnología de LFP con un buen ciclo de vida, a precios moderados y mucha variedad de opciones en el mercado, con empaquetados de tipo bolsa metálica, que nos facilitará la creación del nuevo banco partiendo de la estructura de soporte original, reduciendo la inversión a realizar.

#### 4.1.2 Dimensionamiento del nuevo banco de baterías

En el trabajo experimental, para el diseño del nuevo banco de baterías se utilizó como guía al sistema de almacenamiento original, debido a que un vehículo híbrido tiene un funcionamiento complejo de modelar en cuanto al uso del motor IC y motor eléctrico, además que el fabricante generalmente no detalla el algoritmo de funcionamiento. Se toma como referencia voltajes nominales y capacidades máximas de corriente en carga y descarga, obtenidas al transitar con el vehículo en distintos entornos de conducción a diferentes velocidades promedio con la batería original.

Además, se conoce que los híbridos pueden tener diferentes tamaños de batería, desde micro híbridos con una batería muy pequeña de 48 V y 10 Ah o supercapacitores hasta híbridos enchufables con un rango de 60 km en modo eléctrico puro [66]. La capacidad de la batería puede ser tan baja como 1 kWh hasta 10 kWh [67].

La batería para un híbrido de serie equivalente también debe ser capaz de entregar la misma potencia que la batería de un EV porque los vehículos son esencialmente del mismo tamaño y peso

y durante períodos intermitentes la batería será la única fuente de energía. Sin embargo, debido a que el requerimiento de energía se comparte con un motor de combustión interna (ICE), la capacidad de la batería requerida es mucho menor. Los híbridos paralelos pueden tener diferentes formas para compartir la energía y, por lo tanto, sus requisitos de energía podrían adaptarse a baterías de menor potencia. Además, se tienen limitaciones de diseño en el peso y el tamaño de la batería, que por lo general son de menos de una décima parte del tamaño de las baterías EV usadas en el mismo tamaño de vehículo [67]. La consecuencia inevitable es que, para obtener la misma potencia, las baterías HEV deben ser capaces de entregar corrientes continuas de 10 C o hasta 40 C. El requisito de energía es intermitente (pero mucho más largo que las demandas de pulso corto) ya que se comparte con el ICE. La capacidad de la batería es, por lo tanto, menos importante que la entrega de potencia en un HEV porque el rango puede ampliarse mediante el uso del motor IC. Por lo tanto, las baterías HEV están optimizadas para la potencia. La desventaja es que, debido a su baja capacidad, una batería HEV se carga y descarga continuamente durante el funcionamiento normal y puede experimentar el equivalente a cien ciclos de carga y descarga por día. Con descargas profundas, la batería se desgastaría en unas pocas semanas. Sin embargo, se sabe que la vida útil de la batería aumenta exponencialmente a medida que se reduce el DOD (Profundidad de descarga), por lo que las baterías HEV deben funcionar a DOD parcial para extender la vida útil. Esto significa que la capacidad de la batería debe aumentarse en consecuencia para permitir DOD más bajos, aunque la capacidad total casi nunca se usa. Por lo general, la batería HEV funciona entre 40% y 80% SOC. Se puede lograr una vida útil más larga utilizando baterías de mayor capacidad para que los límites de SOC varíen en rangos más reducidos como puede ser entre 60% y 75%, reduciendo el DOD [67].

Conociendo las mejoras que se pueden lograr aumentando la capacidad de la batería, en la Tabla 4.1 se realiza una comparación de los sistemas de almacenamiento de los diferentes vehículos híbridos disponibles en el mercado, su tipo de tecnología, y su capacidad energética.

**Tabla 4.1 Sistemas de almacenamiento disponibles en el mercado**

<b>Vehículo</b>	<b>Tipo de batería</b>	<b>Capacidad</b>
Toyota RAV4	NMH	1.6 kWh
Toyota Highlander	NMH	1.9 kWh
Honda Insight	NMH	0.58 kWh
Ford Mondeo	Li-ion	1.4 kWh
Hyundai Kona	Li-ion	1.56 kWh
Hyundai Ioniq	Li-ion	1.56 kWh
Renault Clio E-Tech	Li-ion	1.2 kWh

Renault Captur E-Tech	Li-ion	9.8 kWh
Kia Niro HEV	Li-ion	1,56 kWh
Kia Niro PHEV	Li-ion	8.9 kWh
Chevrolet Volt	Li-ion	16.5 kWh
Chevrolet Malibu	Li-ion	1.5 kWh

Como se puede notar la mayoría de vehículos híbridos tienen una capacidad de entre 1 y 2 kWh, y en algunos casos hasta 10 kWh, limitando el incremento de la capacidad por el peso y tamaño del paquete de baterías, por lo cual es necesario buscar la mejor combinación entre estos diferentes factores para asegurar los requerimientos de voltaje y potencia. Finalmente intentando mantener el mismo peso del paquete de baterías original y dimensiones similares para poder adaptar en la estructura disponible debajo del asiento trasero del vehículo, se optó por celdas de Li-ion LFP de 3.3 V y capacidad de 20 Ah, con una configuración de 50 celdas en serie, para formar el nuevo banco de baterías con un voltaje nominal de 165 V y una capacidad de 20 Ah, obteniendo una capacidad de 3.3 kWh.

#### 4.2 Diseño del banco de baterías nuevo

La unidad básica para armar el nuevo banco de baterías, es una celda de Li-ion polímero del tipo LFP ( $LiFePO_4$ ), cuyas características se muestran en Tabla 4.2.

**Tabla 4.2 Especificaciones de la celda de Li-ion LFP para el armado del nuevo bloque**

<b>Tipo</b>	Li-ion polímero LFP
<b>Voltaje Nominal</b>	3.3 V (al 50% de SOC)
<b>Capacidad Nominal</b>	20 Ah
<b>Capacidad Mínima</b>	19.5 Ah
<b>Rango de Voltaje</b>	2 a 3.6 V (descarga y carga total)
<b>Máximo voltaje terminal absoluto</b>	4 V



<b>Corriente estándar de carga recomendado</b>	20A (a 3.6V)
<b>Corriente máxima de carga recomendado</b>	100A (a 3.6V, Tcelda < 85°C)
<b>Corriente continua de descarga máxima</b>	200A (23°C ≤ Tcelda ≤ 85°C, 50% SOC)
<b>Pulso de 10s de corriente en descarga</b>	600A (23°C ≤ Tcelda ≤ 85°C, 50% SOC)
<b>Pulso de 10s de potencia en descarga</b>	820W (100% SOC, 23°C Tcelda)
<b>Resistencia Interna</b>	1.5 – 3 mΩ (10s, 240A, 50% SOC)
<b>Potencia Específica</b>	2400 W/kg
<b>Energía Específica</b>	131 Wh/kg
<b>Densidad Energética</b>	247 Wh/L
<b>Temperatura de operación</b>	-30 °C a 60°C
<b>Peso</b>	495 g
<b>Ciclo de vida</b>	3000 ciclos (100 % ciclos completos DOD, 1C/-2C, 23°C)
<b>Longitud</b>	227 mm
<b>Ancho</b>	160 mm
<b>Grosor</b>	7.25 mm

La celda tiene un empaquetado en forma de bolsa metálica, fabricada por la empresa A123 Systems, con 2 electrodos salidos formando lo que viene a ser el ánodo (a base de grafito) y cátodo (a base de fosfato de litio). La consistencia de la celda es un tanto gelatinosa, exponiendo al polímero de litio como sustancia que actúa como electrolito, en la Figura 4.1 se puede observar a la celda utilizada en el montaje práctico.



**Figura 4.1 Celda de bolsa metálica Li-ion LFP, usada para la creación del nuevo banco de baterías**

La consideración principal para la construcción del nuevo banco fue el voltaje nominal de cada módulo de la batería, si disponemos de celdas de voltaje nominal de 3.3 V, la solución para igualar el voltaje de cada módulo en la nueva batería es realizar un montaje de 5 unidades en serie, formando un módulo de 16.5 V frente a los 14.4 V del módulo original. Los 2.1 V adicionales no afectan al funcionamiento, ya que las pruebas realizadas en el capítulo 3, respecto al comportamiento del vehículo en las distintas rutas mostraba, que el voltaje total de cada módulo sube como máximo a 18 V (180 V pico de voltaje total).

Entonces al juntar 5 celdas en serie se forma lo que vendría a ser un módulo de la nueva batería, luego se realizarán 10 de estos módulos, formando finalmente el banco nuevo de baterías con un voltaje nominal de 165 V y una capacidad de 20 Ah (al estar todas en serie). Al final se usaron 50 unidades de celdas para formar todo el banco, las especificaciones una vez armado con todas las celdas se muestra en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3 Características del nuevo banco de baterías hecho a base de celdas de Li-ion LFP**

<b>Tipo</b>	Li-ion polímero LFP
<b>Voltaje</b>	16.5 V / módulo
<b>Capacidad</b>	20 Ah
<b>Resistencia Interna</b>	5-7 m $\Omega$ / módulo





<b>Cantidad</b>	10 módulos
<b>Voltaje total</b>	165 V
<b>Corriente de carga</b>	100A (a 3.6V, Tcelda < 85°C)
<b>Voltaje final de carga (EOD)</b>	180 V (3.6V por celda a 100% SOC)
<b>Corriente máxima de descarga</b>	200A (23°C ≤ Tcelda ≤ 85°C, 50% SOC)
<b>Voltaje de corte en descarga</b>	100 V (2V por celda a 0% SOC)
<b>Peso</b>	25.5 Kg
<b>Energía Específica</b>	129.41 Wh/Kg
<b>Largo</b>	25 cm
<b>Ancho</b>	40 cm
<b>Alto</b>	16 cm

Las características del nuevo banco de baterías basado en todas las pruebas experimentales realizadas en el capítulo 3, en principio exhiben las especificaciones suficientes para suplir todos los requerimientos de máximos y mínimos de corriente y voltaje que el banco de baterías original suministra al sistema híbrido.

Para el montaje de los 10 módulos se usaron 5 celdas en serie y un fusible de protección en la interconexión de las celdas 5 y 6, la Figura 4.2 muestra los detalles para una mayor compresión. El módulo original de igual manera tiene un fusible en la mitad de la conexión de celdas de tal forma que en cualquier momento se pueda desconectar a todo el módulo si se lo requiere. Dentro del diseño del bloque de baterías también se toma en cuenta los cables de la BMS (Battery Management System) incorporada del vehículo, la cual se encarga de realizar la equalización de los voltajes de todos los módulos, de tal forma que todos ellos se encuentren en un mismo valor de voltaje. El conexionado del banco junto con la BMS se muestra en la Figura 4.3.

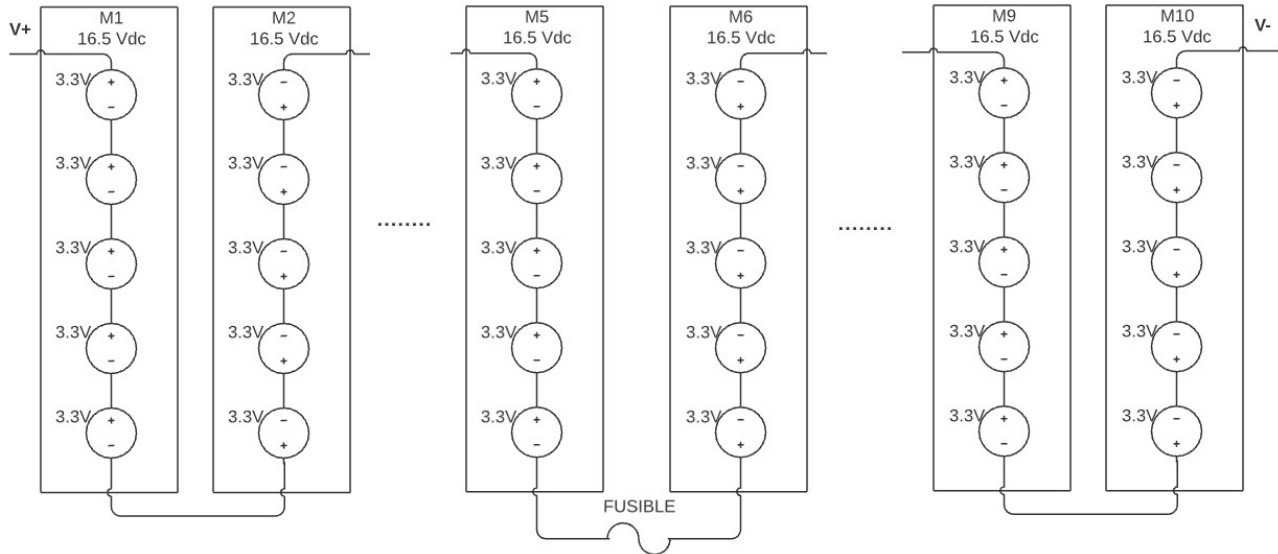


Figura 4.2 Diseño de la configuración en serie para el nuevo banco de baterías

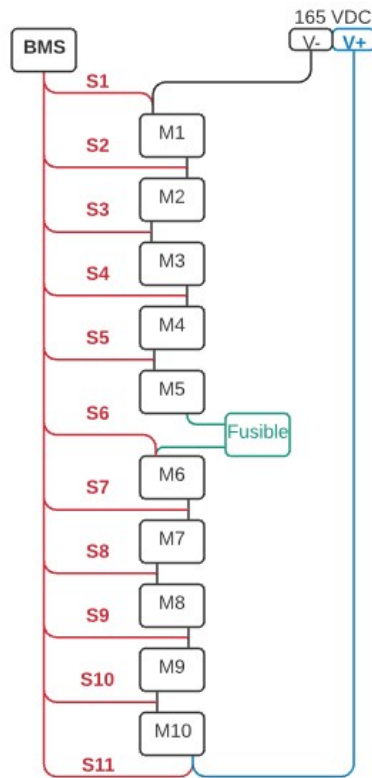


Figura 4.3 Estructura de conexionado de la BMS en el nuevo bloque de baterías

#### 4.2.1 Proceso constructivo y montaje del banco nuevo

La idea para armar la estructura del nuevo banco de baterías, fue una que nos permita asegurar dos electrodos de tal forma que se puedan conectar en serie con las precauciones de aislamiento y seguridad.



**Figura 4.4 Estructura para la unión de dos celdas en serie**

En la Figura 4.4 se muestra la estructura armada a partir de placas metálicas recortadas de tal forma que su longitud horizontal tenga la superficie suficiente por los laterales de la unión para el ingreso de un tornillo con arandela y ajustado con la ayuda de una tuerca. Previamente las placas metálicas una vez recortadas y pulidas, con una capa de pintura en aerosol de color gris y luego una capa de barniz dieléctrico con la ayuda de una brocha, esto con el objetivo de aislar lo máximo posible a los electrodos de la placa metálica, también para la unión y como una medida extra de aislamiento se puso una capa de cinta aislante. Por último, para realizar un aislamiento entre las uniones de celdas vecinas se usó tubo de caucho insertado a presión de tal forma que no exista contacto alguno entre las superficies de tornillos vecinos como se muestra en Figura 4.5.



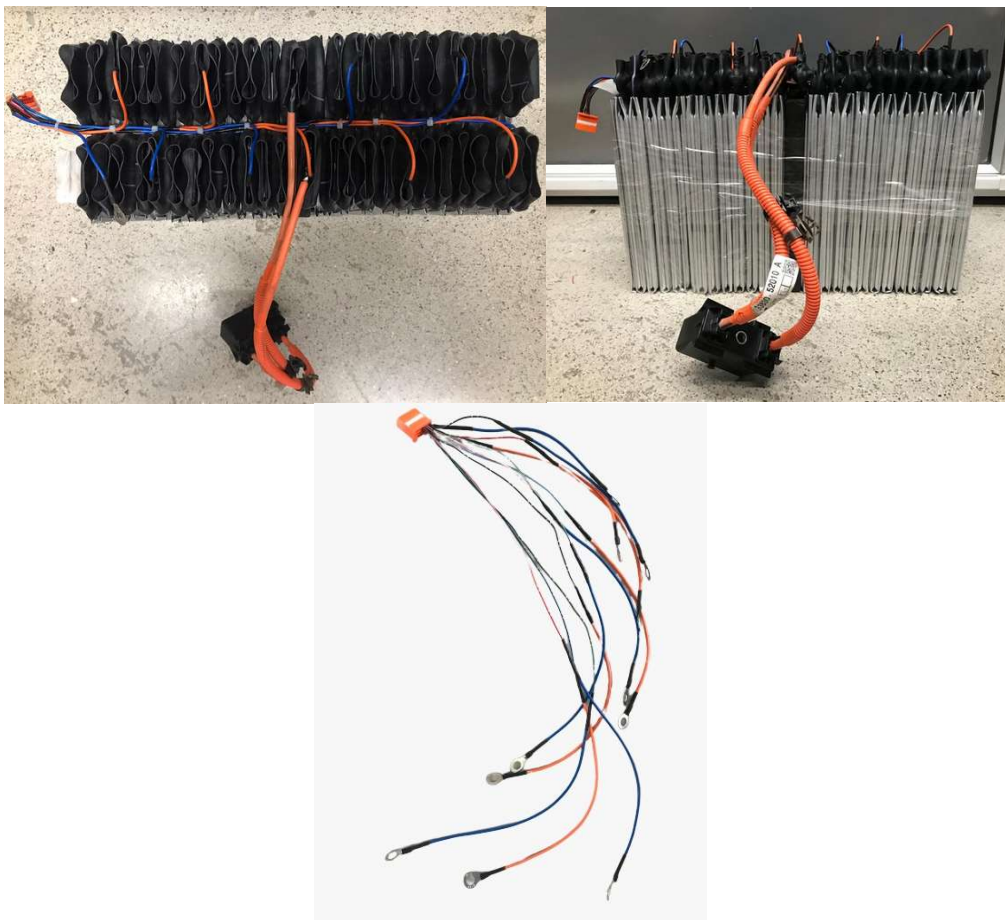
**Figura 4.5 Aislamiento entre las uniones de celdas vecinas mediante tubo de caucho**

En la Figura 4.6 se muestra a los 10 módulos armados y embalados, que luego serán interconectados junto con los cables sensores de la BMS para formar el bloque de baterías completo.



**Figura 4.6 Todos los módulos de 5 baterías en serie usadas para armar el nuevo banco**

Con todos los módulos listos para el armado, se procedió con la adaptación de los cables del fusible y los cables sensores de la BMS, para evitar problemas de compatibilidad con el tipo de conectores en el vehículo, se usa los mismos cables y terminales de la batería original. El cable del fusible se conecta a 2 electrodos por separado (electrodo positivo del módulo 5 y electrodo negativo del módulo 6), de forma que al conectarlo haga contacto a los 2 electrodos como si estuvieran directamente conectados entre ellos, el cable dispone de terminales planos que facilita ajustarlos en contacto con el electrodo. El cable de la BMS se tuvo que modificar de forma tal que la longitud de sus terminales sensores llegue a la interconexión entre 2 módulos, todos los sensores llegan al conector original de fábrica, mediante un empalme con un cable AWG #18, reforzado con estaño y un tubo termo retráctil. La interconexión final y el cable modificado para la BMS se muestra en la Figura 4.7.



**Figura 4.7 Banco de baterías con todos los módulos interconectados, junto con el cable modificado de la BMS y el cable para la conexión del fusible**

El fusible del sistema original que interconecta a todos los módulos y permite formar el banco de 165 V, ingresa de forma precisa al conector hembra que se ensambló junto a la batería, este se muestra en la Figura 4.8.



**Figura 4.8 Fusible o puente de conexión para el banco de baterías**

El proceso constructivo continuó con el diseño y adaptación del bloque completo a la estructura de soporte que se ubica bajo el asiento trasero del vehículo y una estructura que permita sostener y aplicar una presión perpendicular a la superficie de las celdas de tal forma que todas se

encuentren compactas y aseguradas, evitando que la fuerza de aceleración del vehículo las maltrate.

Mediante unas placas de plástico y unos tubos transversales a la superficie de las celdas con rosca interior se puede aplicar la presión necesaria para contener a todo el conjunto de celdas. En estas mismas placas mediante tornillos se juntaron unas canales de metal con el objetivo de ajustar las placas y todo el conjunto de celdas a la estructura base que va atornillada en el piso del vehículo en el asiento posterior. Las mismas placas sirven para sujetar al sensor de voltaje de la batería híbrida (Figura 4.9), donde termina la conexión del cable de la BMS y los sensores de temperatura, los cuales son 3 y están distribuidos a lo largo de la batería. En la otra placa de plástico se encuentra la caja de los relés y la toma de potencia de donde obtiene el voltaje total el vehículo, aparte también tiene un puerto para la comunicación del todo el sistema con la ECU del vehículo (Figura 4.10). En la estructura base junto con tornillos va ajustado el ventilador y una toma de aire debajo de las baterías para contrarrestar las altas temperaturas en las cuales el banco puede llegar a operar. Toda la estructura descrita se muestra en la Figura 4.11.



Figura 4.9 Terminal de lectura de la BMS o sensor de voltaje

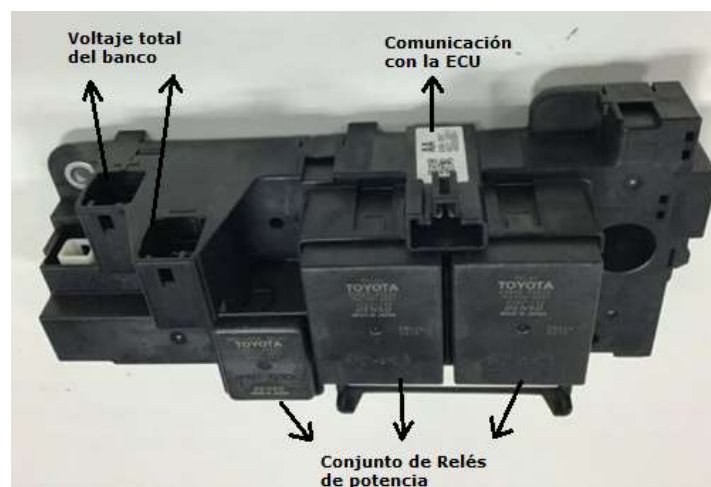


Figura 4.10 Caja de relés de potencia del banco de baterías original





**Figura 4.11 Banco de baterías nuevo junto con todos los componentes**

Finalmente, la estructura original encaja perfectamente en el piso del vehículo en donde es atornillada evitando su libre movimiento y sobre ella una estructura de metal la cual encaja con el asiento trasero a la vez que evita que los pasajeros se sienten directamente sobre la estructura de la batería, como se muestra en Figura 4.12.



**Figura 4.12 Nuevo banco de baterías montado sobre la estructura original y debajo del asiento trasero**

### 4.3 Análisis Económico

El análisis de la factibilidad económica es importante para determinar si es viable realizar el proyecto con la opción de replicarlo de manera comercial, para lo cual se analizan los costos de la batería original directamente con el concesionario automotriz y los costos del ensamblaje de un nuevo banco de baterías a partir de la tecnología de almacenamiento escogida como es polímero Li-ion del tipo LFP.



### 4.3.1 Costo de batería original

Se realizó una cotización directamente en la concesionaria automotriz Importadora Tomebamba en la Ciudad de Cuenca, en la cual se menciona que la batería se encuentra libre de aranceles desde junio del 2019, lo que reduce el precio estimado al momento de iniciar el proyecto a \$2,139.62. La proforma se muestra en la Figura A.1 del anexo A.

### 4.3.2 Costo de ensamblaje a partir de polímero Li-ion del tipo LFP.

Para la importación de las baterías se desglosan todos los costos en la Tabla A.1 del anexo A.2, en la cual incluyen costo del producto, transporte marítimo, gastos en agente de aduana, almacenaje de carga en las bodegas de INARPI y la firma electrónica necesaria para realizar la importación, obteniendo un total de \$1,342.52.

Para la construcción del nuevo banco de baterías se desglosan todos los costos en la Tabla A.2 del anexo A.2, en la cual se incluyen todos los materiales necesarios para uniones entre electrodos, aislamiento entre módulos y estructura que permita mantener fijas las celdas con el vehículo en funcionamiento, con un total de \$55.00.

En la Tabla 4.4 se suman los costos de importación y de construcción obteniendo un total de \$1,397.52.

**Tabla 4.4 Costo total del banco de baterías de Li-ion**

Costos de importación	\$1,342.52
Costos de construcción	\$55.00
<b>Total</b>	<b>\$1,397.52</b>

Los gastos asumidos en el montaje del nuevo banco de baterías, serían de un precio menor comparado con el reemplazo por un nuevo bloque de la misma tecnología que se encuentra disponible en el mercado por el precio de \$2,139.62, con un ahorro de \$742.10 que representa un 34,68%, además que el nuevo banco de baterías triplica el valor de la energía total del sistema de almacenamiento original.





#### 4.4 Pruebas experimentales

Al igual que el estudio realizado en el capítulo 3, con el banco de baterías original deteriorado se pretende someter al vehículo al mismo tipo de rutas recorridas y mediante el proceso de adquisición de datos con el OBD2 realizar una comparación con el comportamiento del nuevo banco, en principio con el reemplazo se obtendrán mejores resultados en la participación de la batería híbrida en la tracción del vehículo. Los comportamientos de voltajes y corrientes se esperan que sean parecidos a los que se tenían en las pruebas con el banco original. Las variaciones abruptas del SOC generadas debido a que el banco de baterías original ya no retenía la energía suficiente (se completó los ciclos de carga/descarga), se pretende solucionar con el nuevo banco y se verán gráficas con el SOC mucho más estable y de mayor duración.

Las tres rutas que se realizaron y al igual que con el banco de baterías anterior fueron las siguientes:

- Ruta por el centro urbano de la ciudad de Cuenca, aplicación del freno y arranques más reiterados con velocidades que no superan los 30 Km/h
- Ruta por una carretera interprovincial (Cuenca- Parque Nacional el Cajas, sector “3 cruces”), perfiles de subidas y bajadas en la vía más pronunciados, velocidades de conducción más elevadas y cambiantes (40 km/h – 90 km/h)
- Ruta por autopista, velocidades elevadas (> 80km/h) y constantes.

Con estas 3 rutas se pretende obtener y caracterizar el comportamiento del nuevo banco de baterías para finalmente obtener una estimación de la vida útil y saber que tanto se ha ganado en eficiencia del sistema híbrido en cuanto al ahorro de combustible presentado, el aumento en la vida útil o el efecto que tiene aumentar la autonomía (celdas de mayor capacidad de almacenamiento).

##### 4.4.1 Comportamiento en carga y descarga del nuevo sistema de almacenamiento

###### 4.4.1.1 Ruta en autopista

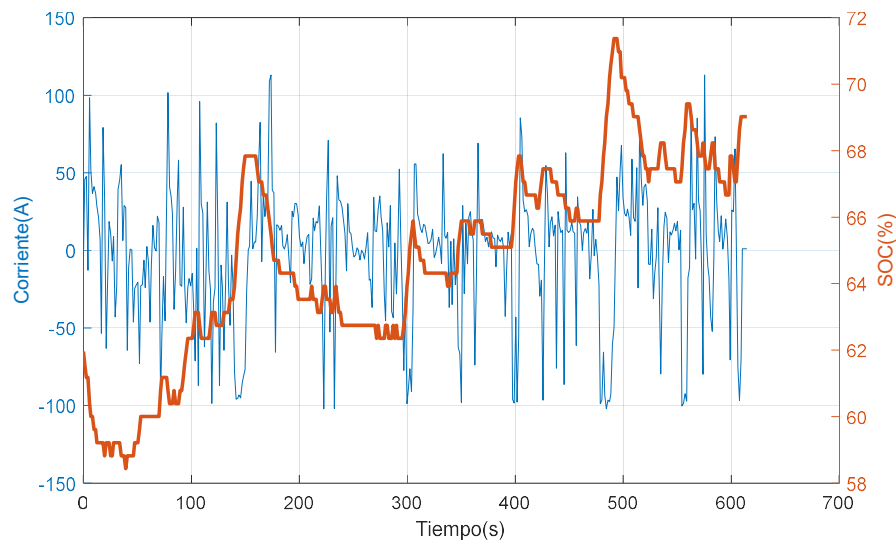
La ruta consta de un tramo de la autopista panamericana que rodea a la ciudad con una distancia de recorrido de 12.83 Km a una velocidad promedio de 70 Km/h, la ruta se muestra en la Figura 4.13.



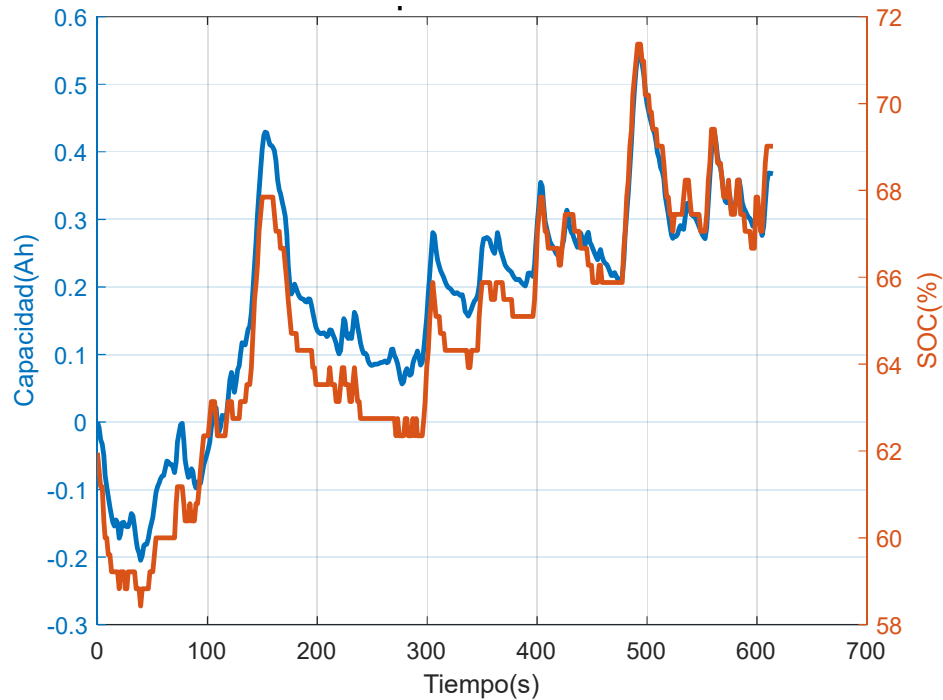
**Figura 4.13 Recorrido realizado para la ruta en autopista con el nuevo banco de baterías**

Como se observa en las gráficas a continuación, la introducción del nuevo banco de baterías no afecta las lecturas del adaptador OBD2, debido a que dichas lecturas de voltaje de la BMS siguen registrando datos, a pesar de que el voltaje nominal del banco subió a 165 V es decir 21 V más de los 144 V nominales del banco original. En otras palabras, no existe un factor de compensación, los niveles de trabajo del nuevo banco siguen estando dentro del rango de lectura de la BMS.

Una primera gráfica de corriente total contra el SOC del banco de baterías nos puede servir para observar como el SOC dependiendo del sentido de la corriente (negativa hacia el banco y positiva sale del banco), se carga o se descarga.



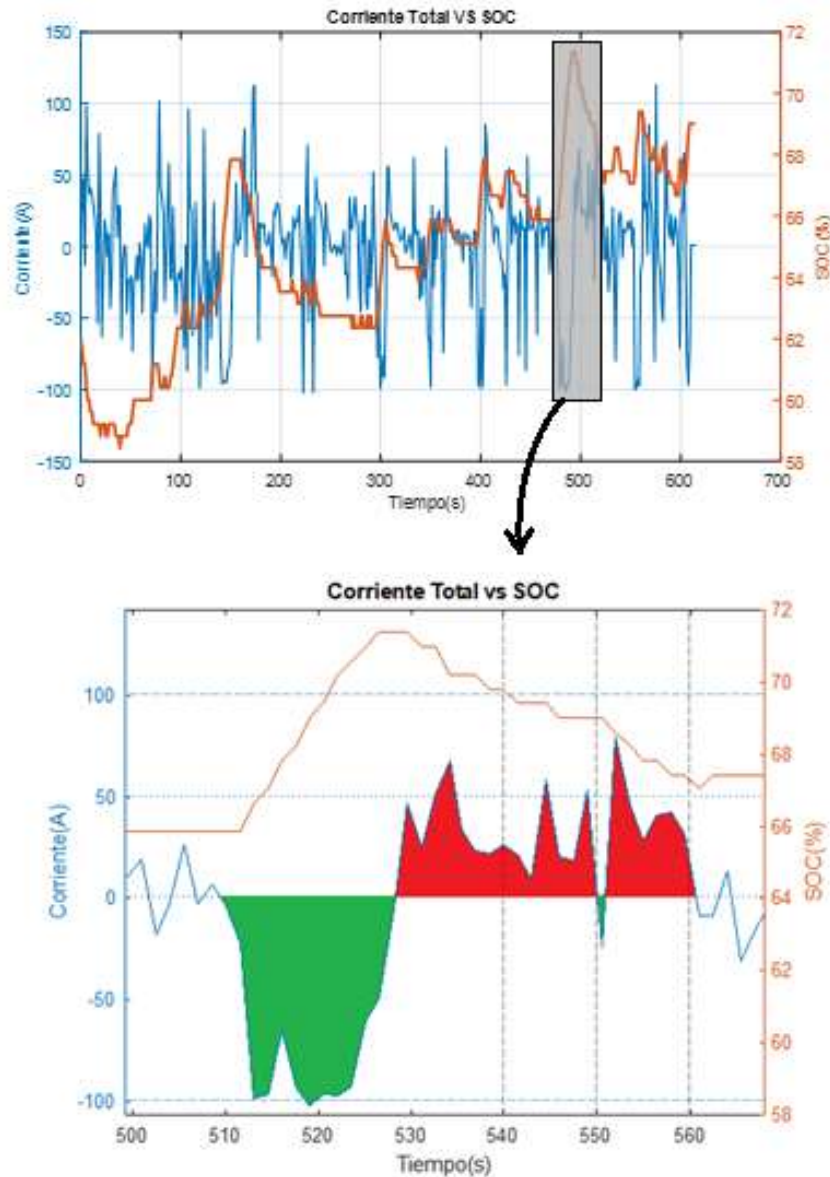
**Figura 4.14 Datos de corriente total y SOC tomados de la ruta en autopista con el nuevo banco de baterías**



**Figura 4.15 Relación entre Capacidad y SOC para la ruta en autopista del nuevo banco de baterías.**

La figura 4.14 muestra como los niveles de corriente llega a picos de -100A producto del frenado regenerativo de alta intensidad que se da en este tipo de rutas (ingreso a redondeles), se ve que si estos niveles de corriente se mantienen en instantes de tiempo (lo que dura la aplicación del freno), el nivel de SOC va en aumento cargando el banco de baterías (en la Figura 4.16 una corriente de -100A cargan el banco desde el 66% al 71% en un intervalo de ~10s). En los casos donde la aplicación del acelerador produce una extracción de energía desde el banco de baterías, produce una corriente positiva, esto de forma directa implica una reducción en el porcentaje del SOC, lo dicho se representa en Figura 4.16 mediante un área verde para el proceso de carga y en rojo para el proceso en descarga, esto para un pequeño rango dentro de la totalidad de datos capturados para la trayectoria recorrida.

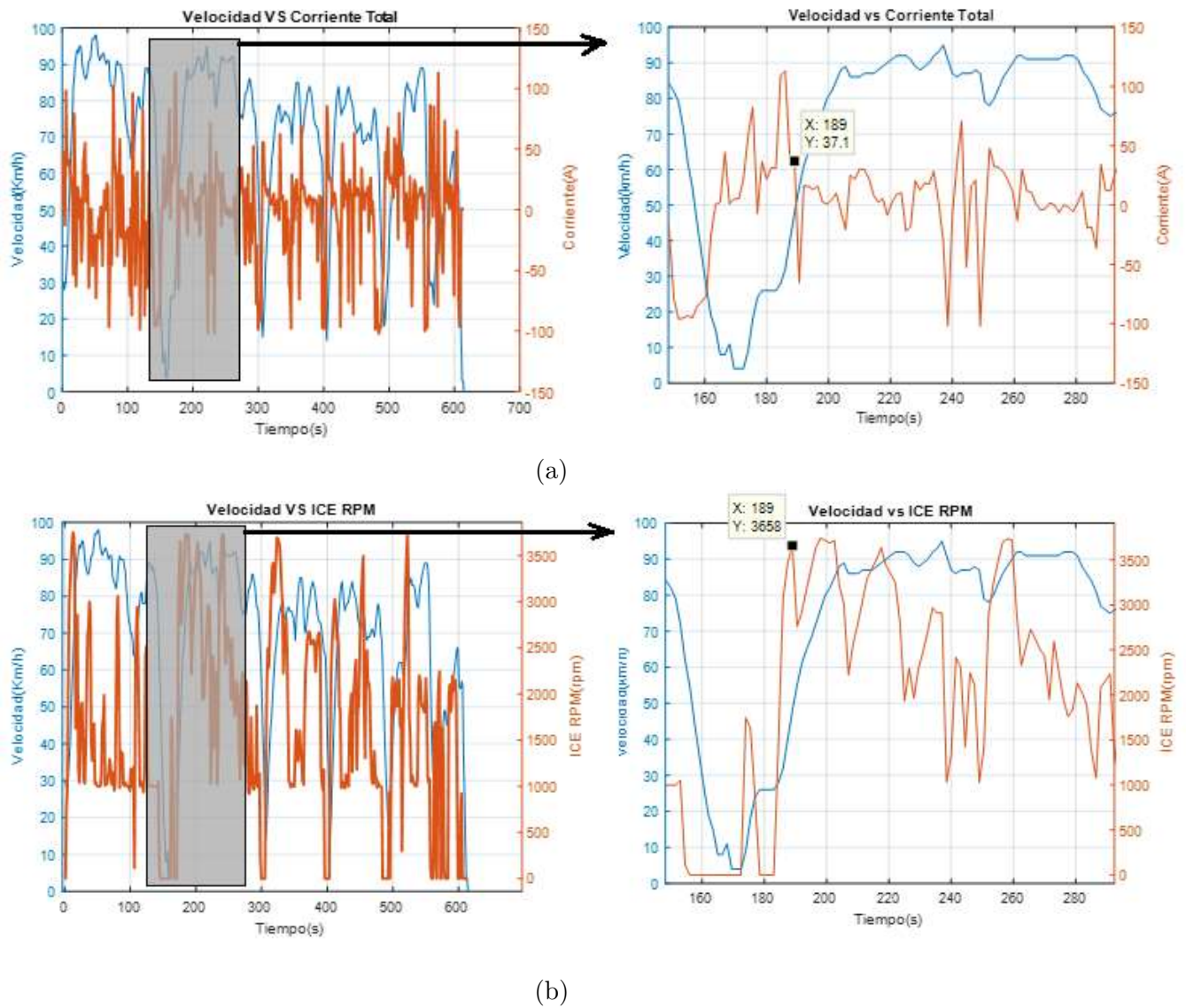
La Figura 4.15 muestra la relación entre la capacidad del nuevo banco producto de una integración numérica de los datos de corriente, y el nivel de SOC presentado, a simple vista se puede notar la relación entre las 2 variables, entonces se puede asumir que la ECU del vehículo utiliza la integral de la corriente para la estimación del SOC, como se trató en el punto 2.2.4.2 sobre el método Integral de Amperios-Hora para la estimación del SOC.



**Figura 4.16** Proceso de carga y descarga del nuevo banco de baterías en la ruta en autopista

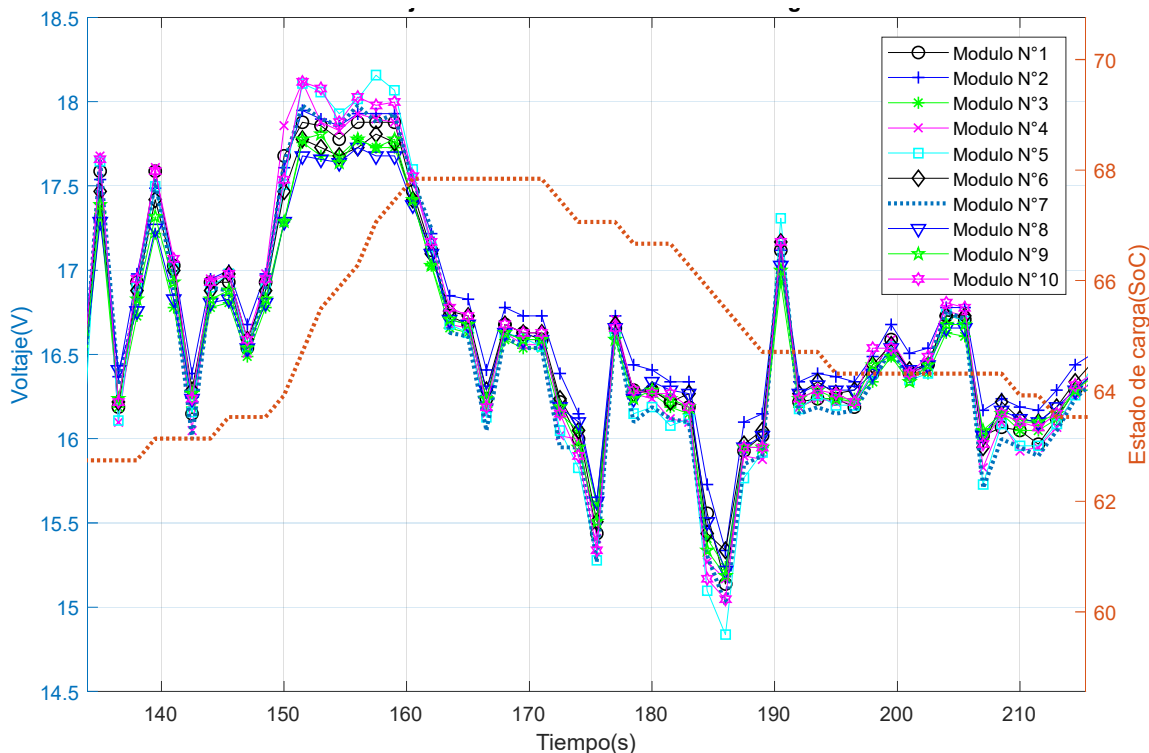
Al observar una gráfica de velocidad contra la corriente total (Figura 4.17a) se nota una clara relación entre las dos variables, para ganar velocidad desde los 3 Km/h hacia los 90 Km/h, en este proceso picos positivos de corriente fueron necesarios hasta los ~ 60 km/h, a partir de este punto el pico de corriente llegó a su máximo valor ~113 A, entonces para seguir ganando velocidad el motor de IC aumenta sus revoluciones (~3600 rpm, Figura 4.17b) en ese instante el motor eléctrico deja de funcionar, por lo que la corriente decrece y mientras tanto ya se logró un ahorro en el consumo de combustible (energía necesaria para pasar de 3 km/h a los 60 km/h). Luego cuando ya se alcanza una velocidad objetivo (alrededor de los 90 km/h) los picos de corriente

tanto positivos y negativos son como apoyos en el intento de mantener la velocidad constante, no es una tracción pura como tal.



**Figura 4.17 (a) Velocidad y corriente para la ruta en autopista (b) Velocidad y ICE RPM para la ruta en autopista**

El comportamiento en cuanto a los voltajes de las celdas es mucho más uniforme que las celdas sustituidas, esta depende exclusivamente del nivel del SOC, si es elevado los niveles del voltaje total de igual manera se ven incrementados y si el SOC es reducido los niveles al igual bajan, lo importante a notar son los intervalos en los que trabaja junto con el SOC y las diferencias de voltaje entre cada uno de los módulos para monitorear el correcto funcionamiento de la BMS.



**Figura 4.18 Voltajes de los 10 módulos y el estado de carga para la ruta de autopista con el nuevo banco de baterías**

En la Figura 4.18, muestra a los voltajes de 10 módulos durante un tramo de la ruta realizada, en ella se observa como el SOC varía de los 63% de SOC a los 68% y mientras que los voltajes suben a un máximo de 18 V y un mínimo de 15 V con una diferencia entre ellos de máximo 0.4 V, siendo este inferior al valor de umbral de 0.8 V con la batería original de NiMH, analizado en el capítulo anterior, y lo que a su vez era el origen del problema en el tablero del vehículo.

#### 4.4.1.2 Ruta en el centro urbano

La ruta seguida para el centro urbano constó de una distancia total de recorrido de 23.94 Km dentro de varias calles y avenidas de la ciudad de Cuenca. La ruta se muestra en la Figura 4.19.

Como se comentó en las pruebas con el banco original, se trata de la ruta crítica en donde se presenta una mayor participación del motor eléctrico sobre la tracción del vehículo lo que supone un mayor consumo y también recarga por frenado regenerativo del banco de baterías.

Un comportamiento a tomar en cuenta fue la variación de los niveles de SOC, durante toda la ruta en ningún momento el porcentaje de almacenamiento bajó del 50% y subió como un pico máximo a los 68% como se muestra en la Figura 4.20 para la totalidad de la ruta.



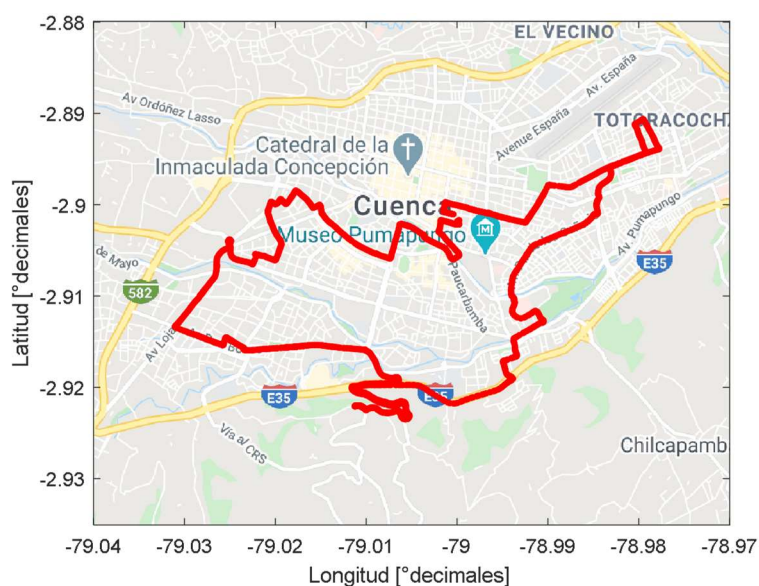


Figura 4.19 Recorrido de la ruta en el centro urbano con el nuevo banco de baterías

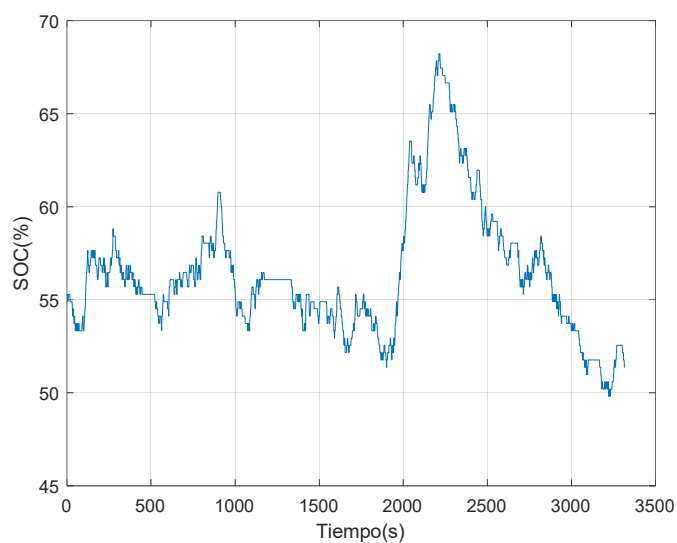
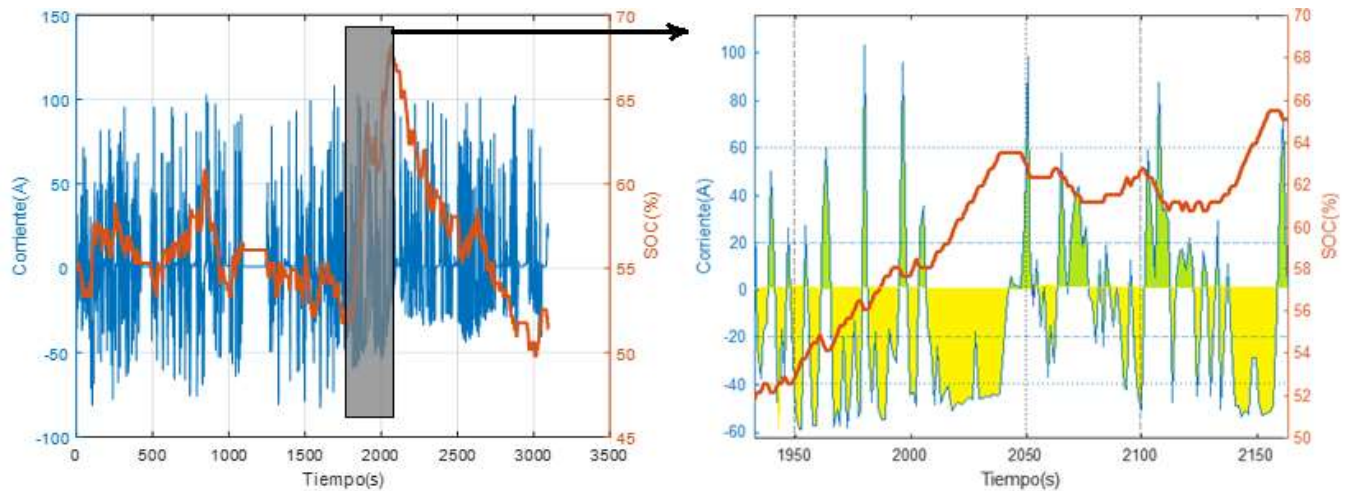


Figura 4.20 Variación del estado de carga en la ruta por el centro urbano con el nuevo banco de baterías

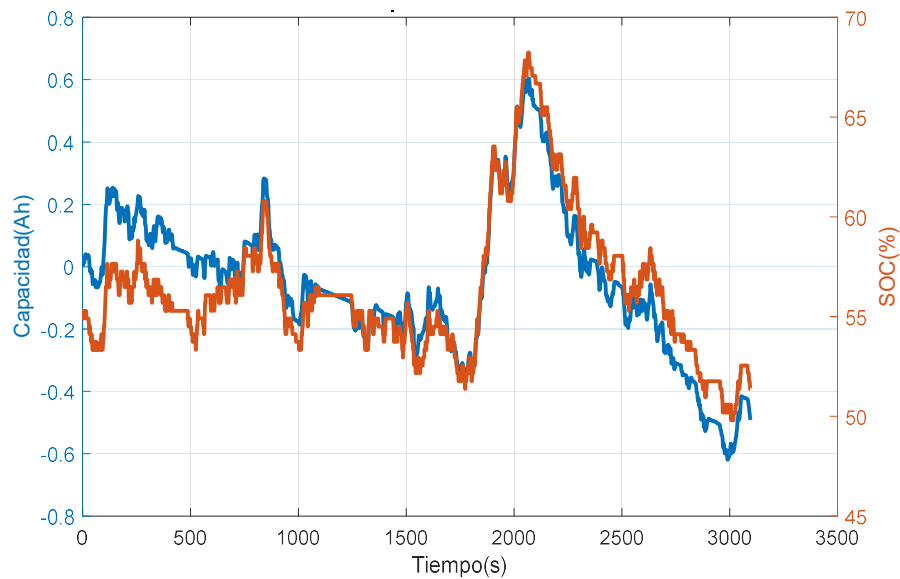
La Figura 4.21 muestra una porción de los datos tomados con un acercamiento que nos permite visualizar la variación del SOC contra la corriente del nuevo banco de baterías, para un tramo dentro de la ruta. Cuando se presenta un pulso positivo de corriente (área verde), esto implica un flujo de corriente proveniente del banco para alimentar al motor eléctrico, el mismo que apoya con la tracción del vehículo. La corriente negativa (área amarilla) resalta la corriente producida por el motor/generador producto del frenado regenerativo que carga el banco de baterías lo que

muestra el incremento en el valor del SOC. Si un rango de tiempo el promedio de la corriente de carga (área amarilla) es mayor a la corriente de descarga (área verde), el porcentaje del SOC irá en aumento, lo que sucede la mayor parte del tiempo en la Figura 4.21.

La relación directa entre capacidad y SOC nuevamente queda comprobada al observar la Figura 4.22 y también justifica lo discutido sobre la corriente y su acción sobre el nivel del SOC

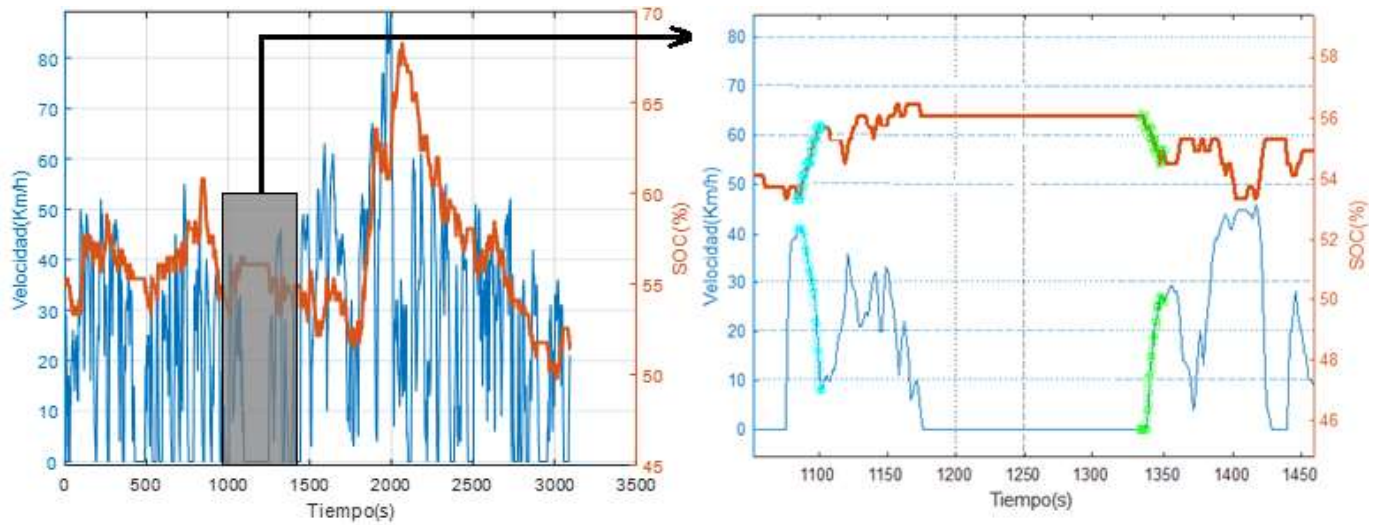


**Figura 4.21 Corriente y SOC para la ruta en el centro urbano con el nuevo banco de baterías**



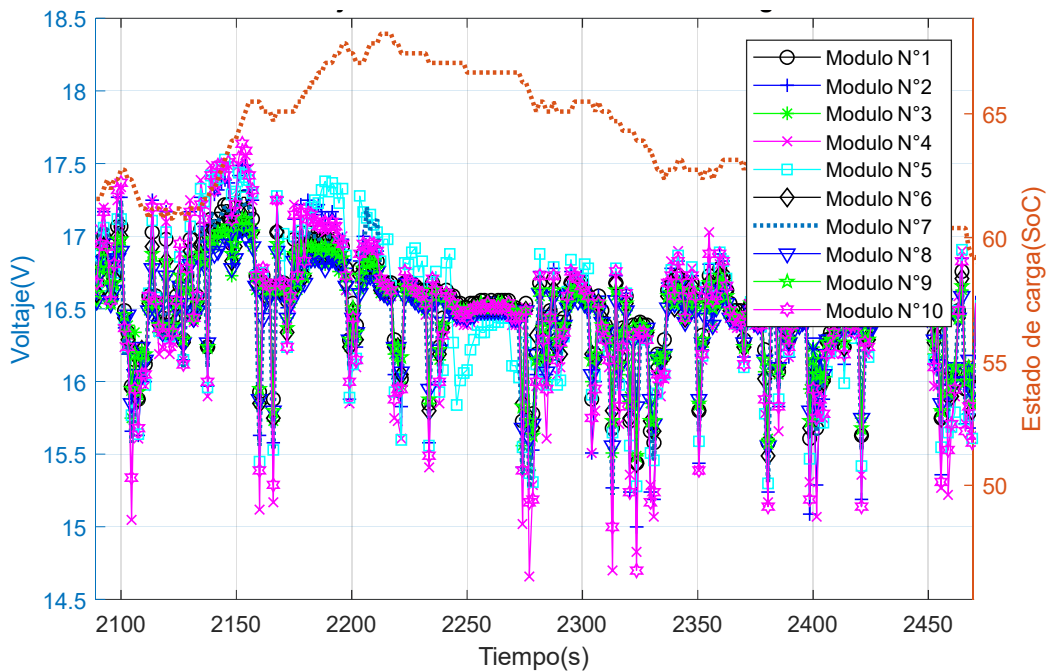
**Figura 4.22 Relación entre Capacidad y SOC para la ruta en el centro urbano del nuevo banco de baterías.**





**Figura 4.23 Datos de Velocidad y SOC para la ruta en el centro urbano con el nuevo banco de baterías**

La Figura 4.23, es una extracción de la totalidad de datos tomados en el trayecto, con el nivel de acercamiento suficiente para permitir el entendimiento necesario, al analizar la relación entre Velocidad y el nivel de SOC. Directamente se nota como los arranques consumen energía (resaltado verde) y como el proceso de frenado regenerativo carga el módulo de baterías (resaltado azul cian) y cuando el vehículo no presenta movimiento alguno el consumo es fijo (el SOC se mantiene en 56%).



**Figura 4.24 Niveles de voltaje de los 10 módulos del nuevo banco de baterías y SOC para la ruta en el centro urbano**

El nivel de ecualización y los valores de voltaje de los 10 módulos se muestran en la Figura 4.24 que es una extracción de la totalidad de datos registrados, con el acercamiento suficiente para facilitar la visualización. Los voltajes de todos los módulos siguen la tendencia del SOC como es de esperar, lo importante a notar es la diferencia que llegan a presentar entre ellos, que por instantes de tiempo llega a un pico de 0.5 V de diferencia entre los módulos, siendo menor al valor de umbral de 0.8 V analizado en el capítulo anterior. La eficiencia en cuanto a la ecualización se podría mejorar si al nuevo sistema de baterías se le hubiera añadido una BMS adicional en paralelo a la BMS del vehículo, de tal forma que los módulos lleguen a estar ecualizados en el menor tiempo posible.

#### 4.4.1.3 Ruta en carretera

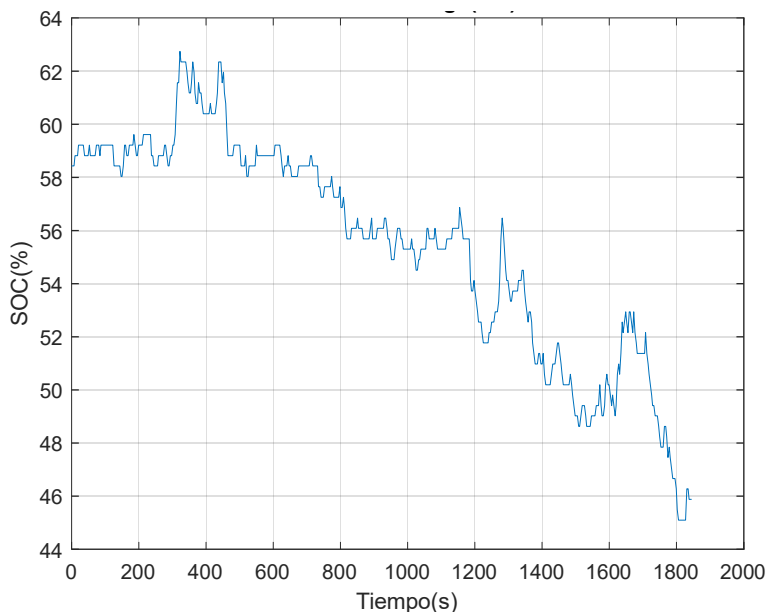


**Figura 4.25 Recorrido de la ruta en carretera realizado con el nuevo banco de baterías**

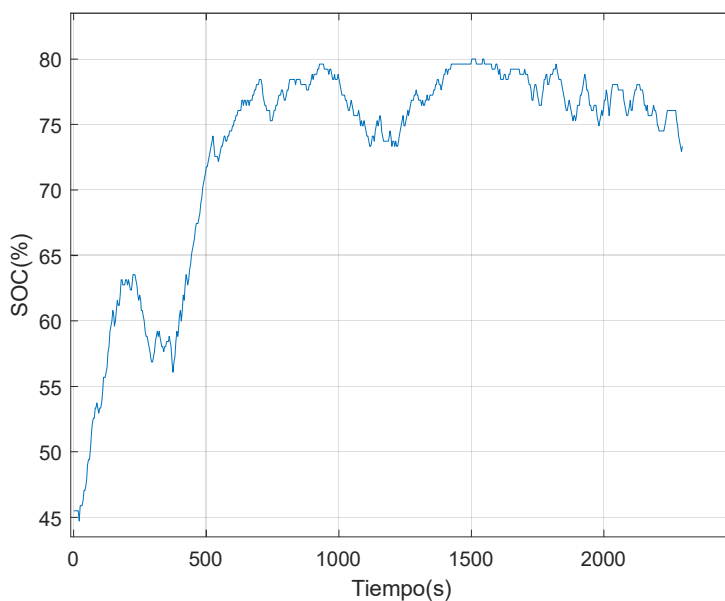
La ruta seguida para el entorno en carreta constó del mismo tramo que se realizó para las pruebas con el banco de baterías original (Figura 4.25) previo al reemplazo y está dividido en dos partes, uno para la ruta de ida desde la ciudad de Cuenca hacia el parque nacional el Cajas “sector 3 cruces” y otra parte para el regreso, el trayecto recorrido fue de 33.6 Km tanto de ida como de retorno, dando una totalidad de 67.2 Km.

El comportamiento del SOC, es el esperado y como resultaba con el banco de baterías original, en el tramo de ida al ser la mayor parte tiempo subida el motor IC trabaja una gran parte del tiempo en la tracción y para la prueba el porcentaje del SOC bajó del 62% al 46% casi sin cargarse en todo el trayecto esto indica que el motor eléctrico ayuda en ocasiones con la tracción del vehículo y en el trayecto de retorno por el contrario el banco de baterías se recargó desde los 45% hasta

los 80% y manteniéndose sobre los 75% hasta finalizar la ruta. Esto se puede observar en la Figura 4.26 y la Figura 4.27 que muestran los comportamientos descritos para el estado de carga.



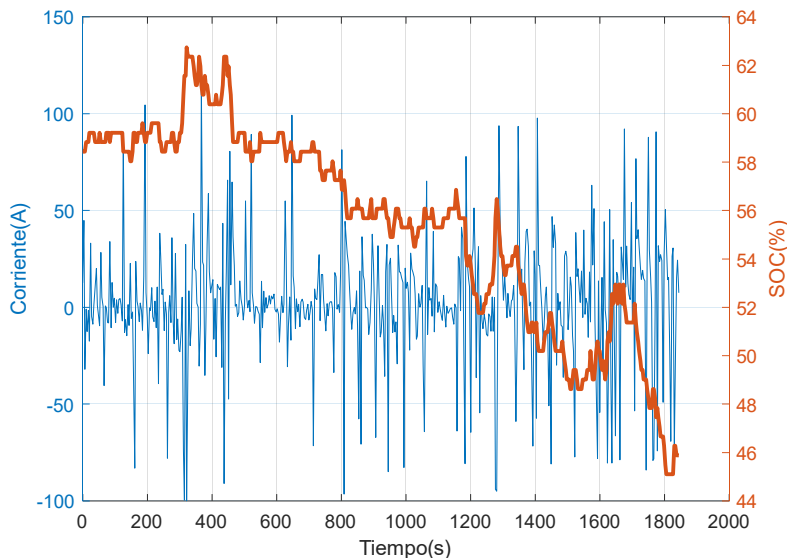
**Figura 4.26 Variación del SOC para la ruta en carretera con el nuevo banco de baterías-trayecto de ida**



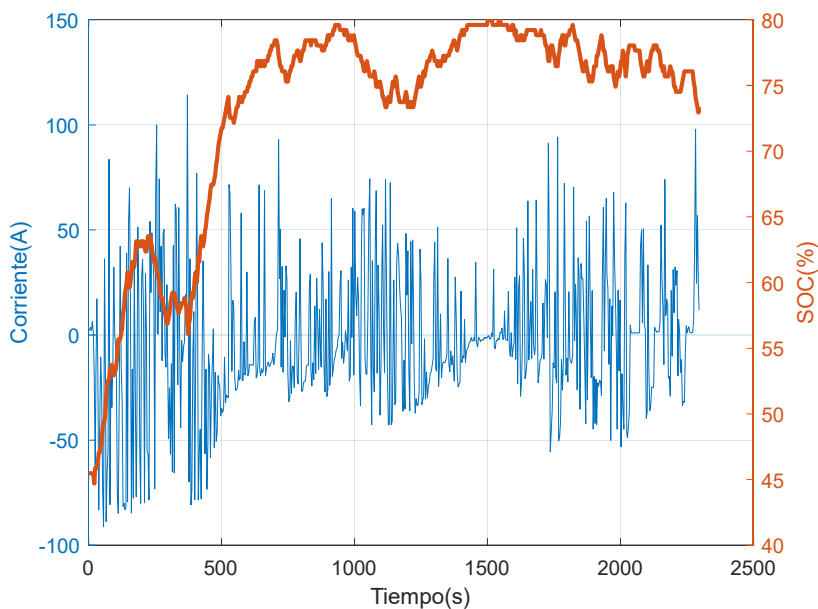
**Figura 4.27 Variación del SOC para la ruta en carretera con el nuevo banco de baterías-trayecto de retorno**

Al analizar el comportamiento de la corriente (Figura 4.28 para la ida y Figura 4.29 para el retorno) nos ayuda a entender los valores en los que trabaja conforme el banco es cargado o descargado, en la ruta de retorno, la carretera al ser gran parte de bajada, el proceso de frenado

regenerativo está muy presente, por este motivo la mayor parte del tiempo la corriente se encuentra negativa con picos de  $-90$  A y las pocas veces que se extrae energía del banco se presentan valores máximos de  $100$  A. Para la ruta de ida los rangos de la corriente varían entre  $100$  A y  $-100$  A mientras el nivel del SOC se encuentra constantemente disminuyendo.



**Figura 4.28 Datos de corriente y SOC tomados de la ruta de carretera(ida) con el nuevo banco de baterías**

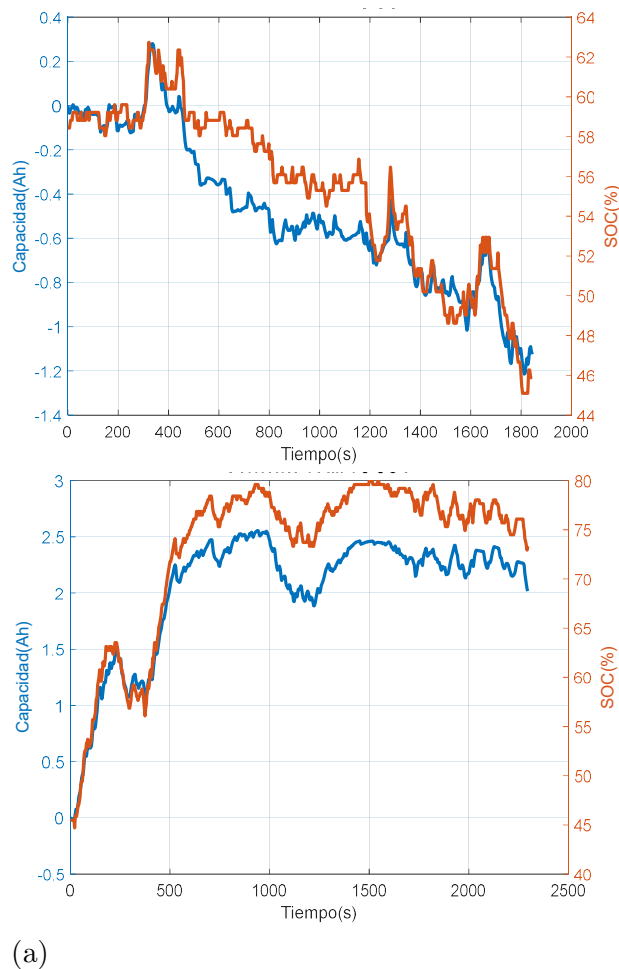


**Figura 4.29 Datos de corriente y SOC tomados de la ruta de carretera(retorno) con el nuevo banco de baterías**

La ruta de retorno también es de mucha ayuda ya que nos ayuda a seguir comprendiendo el comportamiento de los niveles de voltaje de los módulos, esta presenta los estados de carga más

altos que ninguna otra ruta que se realizó, 80%, por lo que se espera que el nivel de voltaje nominal sean los más altos registrados.

El proceso de realizar la integración numérica de la corriente y compararla con los niveles de SOC, evidencia otra vez la relación directa entre estas 2 variables, y que la ECU del vehículo aprovecha a la hora de realizar la estimación del SOC. Estas curvas siguen una misma tendencia como se evidencia en la Figura 4.30.



**Figura 4.30 Relación entre la capacidad y el SOC para la ruta en carretera con el nuevo banco de baterías (a) ida (b) vuelta**

En la Figura 4.31 (porción de todos los datos registrados con el acercamiento necesario que ayuda a visualizar mejor los comportamientos) el nivel de voltaje se puede observar cómo llega a un pico de 18.25 V que es alcanzado en un instante de tiempo por el módulo 4 mientras se encontraba cargándose y el estado de carga del módulo completo se encontraba en el 52%. Las diferencias de voltaje se mantienen bajo los 0.5 V. En la Figura 4.32 muestra el instante dentro de todos los datos registrados, en cual el voltaje ya no sube más, con el SOC alcanzando el 80% de capacidad; los módulos solo son ecualizados, esto nos lleva a la suposición de que con el nuevo banco de

baterías el SOC llega como máximo a 80% y ya no se sigue recargando más a pesar de que todavía el vehículo podría aprovechar la energía del frenado regenerativo. En la eualización de los voltajes se puede observar que el módulo 5 es el más variable y se encuentra con un voltaje diferente al resto de módulos.

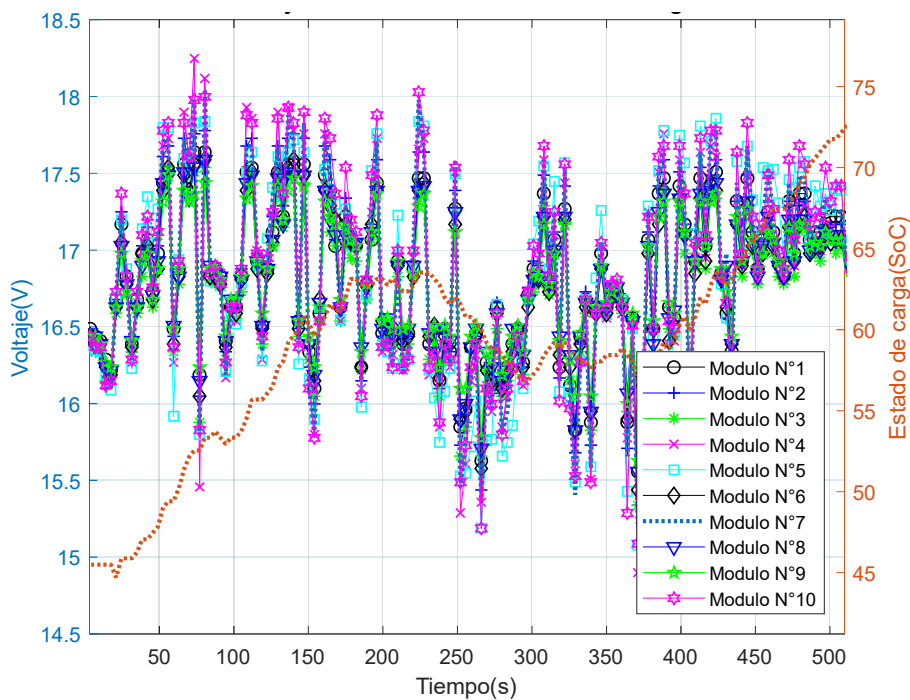
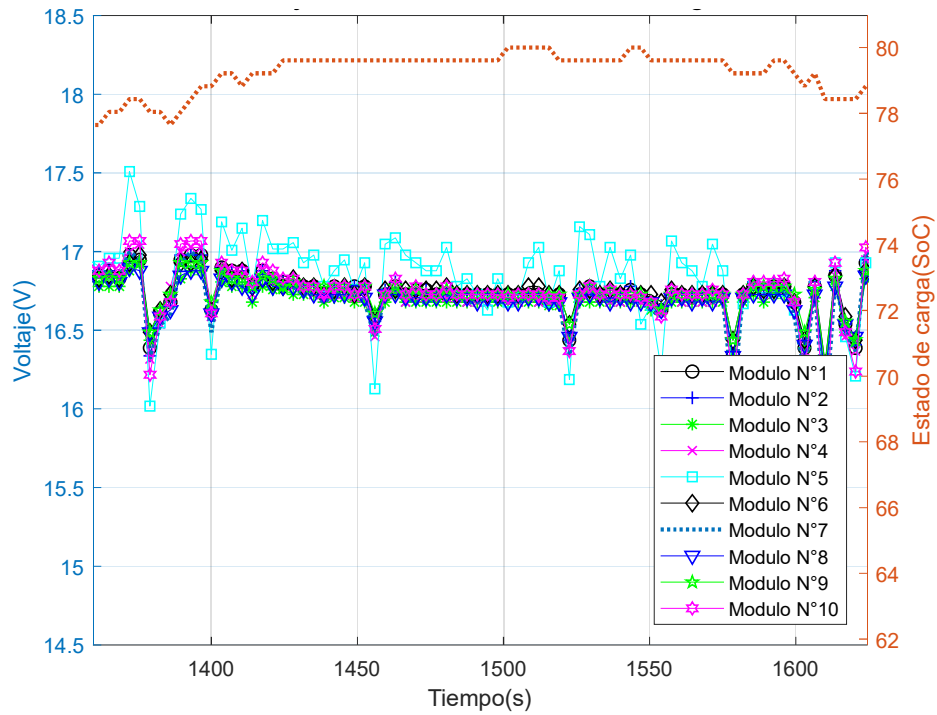
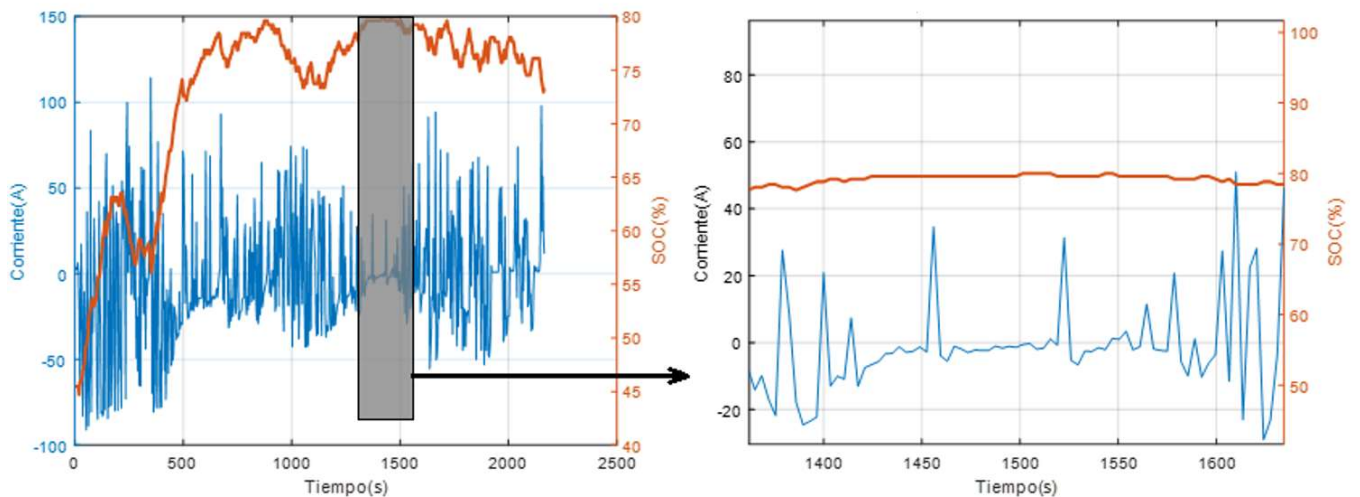


Figura 4.31 Voltaje de los 10 módulos y SOC para la ruta de carretera(retorno) con el nuevo banco de baterías



**Figura 4.32** Ecuación de los módulos cuando el nivel de SOC alcanza el máximo (80%)

La Figura 4.33 muestra el instante en el cual a pesar de que el vehículo sigue descendiendo por la ruta de retorno ya no recarga más el banco de baterías llegando a un valor máximo de 80%.



**Figura 4.33** Máximo nivel de SOC alcanzado en la ruta de retorno



#### 4.4.1.4 Condiciones típicas de operación para el nuevo banco de baterías

Con las pruebas realizadas para varias rutas en los 3 ambientes de conducción descritos se puede armar un cuadro resumen con las condiciones típicas de operación del vehículo luego de haber realizado el reemplazo a la nueva tecnología de Li-ion (LFP), esta se muestra en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5 Rangos típicos de operación del nuevo banco de baterías para las 3 rutas bajo análisis**

<b>Ambiente de conducción</b>	<b>Rango de Velocidad (Km/h)</b>	<b>Rango de voltaje de operación</b>	<b>Rango de corriente de operación</b>	<b>Rango de variación del SOC</b>
<b>Autopista</b>	60 - 100	180V a 150V	80A a -100A	70% a 60%
<b>Centro urbano</b>	0 - 40	170 V a 150V	115A a -90A	65% a 50%
<b>Carretera(ida)</b>	30 - 60	165V a 150V	100A a -90A	60% a 45%
<b>Carretera (retorno)</b>	60 - 90	175V a 155V	70A a -80A	80% a 70%

Una ayuda adicional para entender el nivel de variación del SOC en las rutas bajo prueba es la desviación estándar respecto a su media, con ello se pretende entender que tanto varió el SOC, en todo el trayecto. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6 Desviación estándar del SOC para las 3 rutas bajo análisis**

<b>Ambiente de conducción</b>	<b>Desviación estándar del SOC (%)</b>
<b>Autopista</b>	2.94
<b>Centro urbano</b>	3.55
<b>Carretera(ida)</b>	4.12
<b>Carretera(retorno)</b>	8.30





#### 4.4.2 Estimación de vida útil

Como se realizó con el cálculo sobre el banco de baterías original en el capítulo anterior, se considerará porcentajes de circulación del vehículo en los 3 diferentes entornos de conducción con los mismos porcentajes para poder realizar una comparación. Estos porcentajes son:

Recorrido en centro urbano: 60% de circulación.

Recorrido en Autopista: 15% de circulación.

Recorrido en Carretera: 25% de circulación.

Se procede con el cálculo de la potencia consumida y almacenada en el banco de baterías para ello se realiza un producto entre el voltaje total junto con la corriente del banco completo, luego se realiza la integración de los valores de potencia con el método numérico de integración trapezoidal en Matlab [64], los resultados se resumen en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7 Consumo energético del nuevo banco de baterías en las 3 rutas bajo análisis**

	<b>Centro Urbano</b>	<b>Autopista</b>	<b>Carretera</b>
<b><math>E_{descarga}</math></b>	1.33238 kWh	0.42434 kWh	2.15351 kWh
<b><math>E_{carga}</math></b>	-1.3292 kWh	-0.52957 kWh	-2.43368 kWh
<b>Distancia</b>	23.938 km	12.831 km	67.487 km
<b>Consumo promedio en descarga</b>	0.05565 kWh/km	0.03307 kWh/km	0.0319 kWh/km

Se nota de forma directa como la ruta en el centro urbano es la que presenta el consumo promedio de energía más elevado del resto de rutas, nuevamente indicando que es la ruta crítica con un mayor requerimiento de energía.

Se sabe los siguientes datos respecto al nuevo sistema de almacenamiento:

$$Ciclos\ de\ vida = 3000\ ciclos$$

$$Capacidad = 20\ Ah$$

$$Voltaje\ nominal = 165\ V$$

$$Energia\ total = 20 * 165 = 3300\ Wh = 3.3\ kWh$$



El nuevo banco de baterías triplica el valor de la energía total del sistema de almacenamiento original que era de 0.936 kWh.

Al realizar la división de la energía total que la batería puede entregar en 1 ciclo (3.3 kWh) para el consumo promedio en descarga, se obtiene la cantidad de kilómetros que se pueden recorrer hasta completar un ciclo.

$$d_{urbano} = \frac{3.3 \text{ kWh}}{0.05565 \text{ kWh/km}} = 59.299 \text{ km/ciclo}$$

Se nota que la distancia que se puede recorrer respecto al sistema de almacenamiento original (27.1312 km/ciclo) es el doble, eso ya que el nuevo banco de baterías tiene una mayor capacidad de almacenamiento.

Multiplicando el valor de la distancia hasta completar 1 ciclo en descarga por el ciclo de vida de la batería original, se obtiene el resultado estimado del ciclo de vida de la batería en función de kilómetros de recorrido.

$$D_{urban} = 59.299 \frac{\text{km}}{\text{ciclo}} * 3000 \text{ ciclo} = 177897 \text{ km}$$

Al realizar cálculos similares para las 2 rutas adicionales se obtiene los resultados mostrados en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8 Vida útil del nuevo banco de baterías en los 3 entornos bajo análisis**

	<b>Centro Urbano</b>	<b>Autopista</b>	<b>Carretera</b>
<b>Ciclo de vida en función de distancia de recorrido</b>	177897 km	299364.983 km	310344.827 km

Al comparar estas distancias con las obtenidas previamente con el banco de baterías original se puede observar un incremento en la distancia de recorrido, los resultados se muestran en la Tabla 4.9.

**Tabla 4.9 Comparación de vida útil entre batería original y baterías de Li-ion**

	<b>Centro Urbano</b>	<b>Autopista</b>	<b>Carretera</b>
--	----------------------	------------------	------------------



<b>Banco de baterías original deteriorado</b>	81393.663 km	296828.752 km	295268.138 km
<b>Nuevo Banco de baterías Li-ion ensamblado</b>	177897 km	299364.983 km	310344.827 km
<b>Porcentaje de mejora</b>	118.56 %	0.854 %	5.106 %

Es importante destacar que se obtiene una gran mejora en la ruta del centro urbano, ya que es donde el motor eléctrico trabaja una mayor cantidad de tiempo (bajas velocidades). Las otras 2 rutas no se mejoran mucho debido que la participación del motor eléctrico no es muy elevada, por ejemplo, como en la ruta en Autopista la mayor parte del tiempo se circula a velocidades alrededor de los 80 km/h donde el motor de IC es el responsable directo de la tracción, el motor eléctrico por lo general solo ayuda en la tracción del vehículo para velocidades bajas (hasta los 60 km/h) y en los arranques y en la aplicación del frenado regenerativo. Para la ruta de carretera de igual forma el trabajo del motor eléctrico no está muy presente, para el trayecto de bajada la mayor parte del tiempo el banco solo se recarga de energía y en el trayecto de subida la tracción requerida es suplida en gran parte por el motor IC, como se observó en la gráfica de las RPM del motor IC. En otras palabras, la ruta que más se podía mejorar en cuanto a la participación del motor eléctrico en la tracción y por ende reducir el consumo de combustible por parte del IC, es en el ambiente urbano y como los resultados muestra se logró una mejora en autonomía del 118.56%, impulsado también por el aumento en la capacidad energética de cada celda.

Considerando los porcentajes de circulación en las distintas rutas bajo estudio se obtiene un resultado final para el ciclo de vida en función de kilómetros de recorrido para un usuario común dentro de los perfiles de conducción descritos.

$$D = 60\% D_{\text{urbano}} + 25\% D_{\text{carretera}} + 15\% D_{\text{autopista}}$$

$$D = 70738.2 + 77586.2 + 44904.7 = 193229.1 \text{ Km}$$

La autonomía en función de kilómetros de recorrido se mejoró en un 15.58% (con el banco original se obtuvo 167177.546 km) para este perfil de circulación en los distintos ambientes considerados. Al igual que el banco original esta duración está ligada exclusivamente en los hábitos y ambientes de conducción por donde el usuario conduzca el vehículo a lo largo de su vida útil y del correcto funcionamiento de la estructura que se fabricó a la hora de armar el banco completo, en el sentido de que dicha estructura no provoque daños físicos a las celdas, ofrezca una correcta ventilación para el control eficiente de la temperatura superficial de las celdas, el deterioro que se produzca



debido al polvo, humedad o suciedad, la duración en el tiempo tanto del aislamiento que se dio a las conexiones entre electrodos, las placas metálicas que permitieron unir a las celdas en serie y los cables adaptados para el fusible y la BMS.

#### 4.4.3 Consumo de combustible

Los kilómetros que puedas recorrer con un híbrido dependerán de una serie de aspectos, como el tipo de conducción, el entorno, la sensibilidad con el pedal del acelerador, la temperatura y el nivel de carga de la batería. Realizando una conducción inteligente y eficiente se puede aumentar considerablemente el número de kilómetros recorridos combinando el depósito de gasolina y las diferentes cargas de la batería eléctrica. Se debe tener en cuenta que no se puede determinar los kilómetros que puedes circular con el motor eléctrico porque la batería se recarga mientras frenas o conduces y cada vez es diferente.

Es por eso que se tomaron diferentes pruebas, realizando una conducción normal dentro de la ciudad, en ocasiones buscando un poco la eficiencia y en otros momentos buscando forzar al motor.

##### 4.4.3.1 Comparación mediante tablero del vehículo

Para este punto se realiza un análisis del consumo de combustible antes y después de la sustitución de la batería original por una de polímero de Li-ion, registrando la autonomía del vehículo, es decir, el número de kilómetros recorridos por un tanque de combustible, siendo 36 litros en el caso del Toyota Prius.

En el primer caso se registra la autonomía del vehículo antes de la sustitución con una conducción normal dentro de la ciudad, obteniendo 361.8 km, con un consumo medio de 8.3 litros cada 100 km como se puede observar en la Figura 4.34. Calculando un consumo de 30 litros debido a que no es recomendable dejar totalmente vacío el tanque de combustible, y con la media de 8.3 L/100km, se obtiene una autonomía de 361.5 km



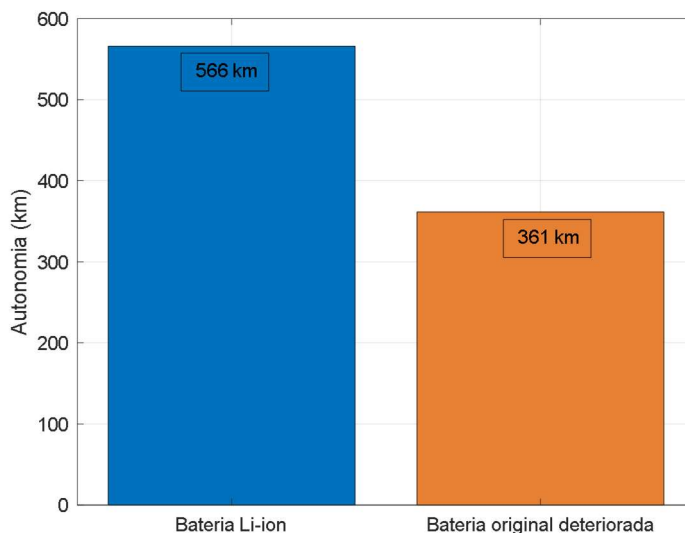
**Figura 4.34 Autonomía con batería original**

De la misma manera se registra la autonomía del vehículo con la nueva batería, intentando mantener el mismo tipo de conducción dentro del mismo entorno, como es la ciudad. Obteniendo 567.1 km con un consumo medio de 5.3 litros cada 100 km como se puede observar en la Figura 4.35. De igual manera se calcula la autonomía estimando un consumo de 30 litros y con la media de 5.3 L/100km, obteniendo una autonomía de 566 km.



**Figura 4.35 Autonomía con batería nueva**

Finalmente se obtienen las diferentes autonomías mostradas en la Figura 4.36, obteniendo un aumento de 205 km en la autonomía, que representa un 56% de mejora de la batería original deteriorada.



**Figura 4.36 Autonomía de batería nueva y batería original**

#### 4.4.3.2 Comparación mediante registros tomados con el OBD2.

Además, se realiza una comparación del consumo de combustible antes y después de la sustitución con datos obtenidos mediante el dispositivo OBD2 en dos entornos de conducción diferentes como es:

- Ruta en un entorno urbano.

Para este análisis se recorrió una distancia de 19 km aproximadamente dentro de un entorno urbano como es la ciudad, intentando realizar la misma ruta y mantener el mismo tipo de conducción en los dos casos como se puede ver en la Figura 4.37.

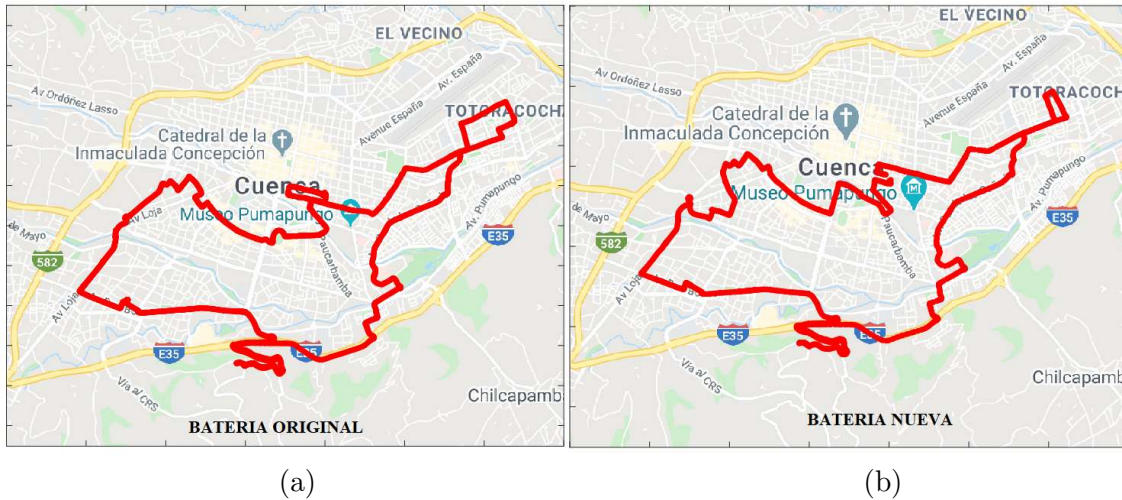


Figura 4.37 Rutas en un entorno urbano (a) Batería original (b) Batería nueva

En el primer caso, con la batería original del vehículo se obtiene un consumo de 1.7 litros, y con el uso de la batería nueva se obtiene un consumo de 0.75 litros (Figura 4.38), lo cual representa un ahorro del 56% de la batería nueva en comparación con la batería original, teniendo en cuenta que el sistema híbrido en conjunto con la batería original ya representa un ahorro de combustible inicial.

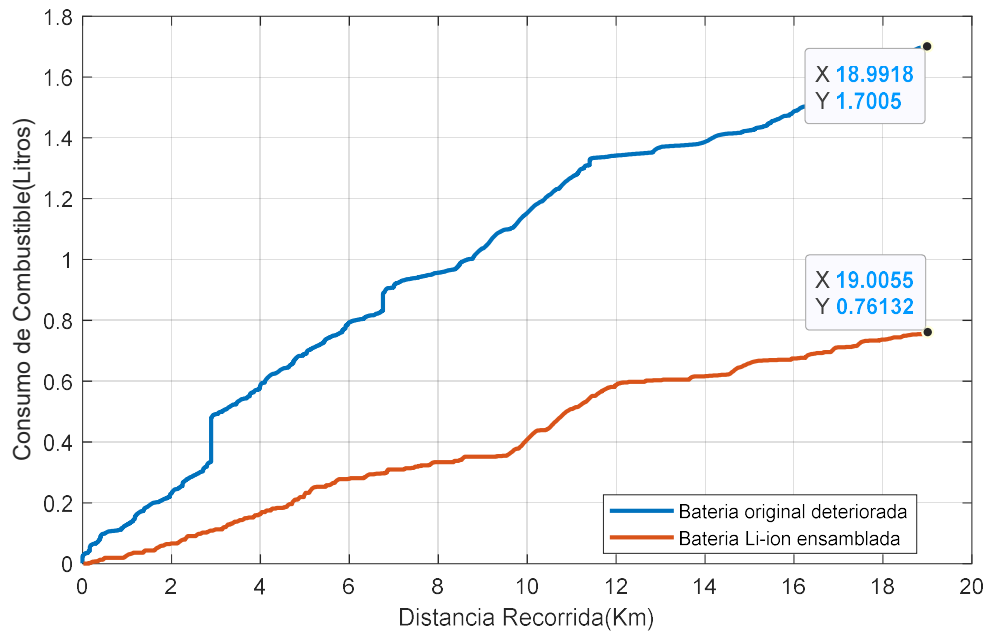
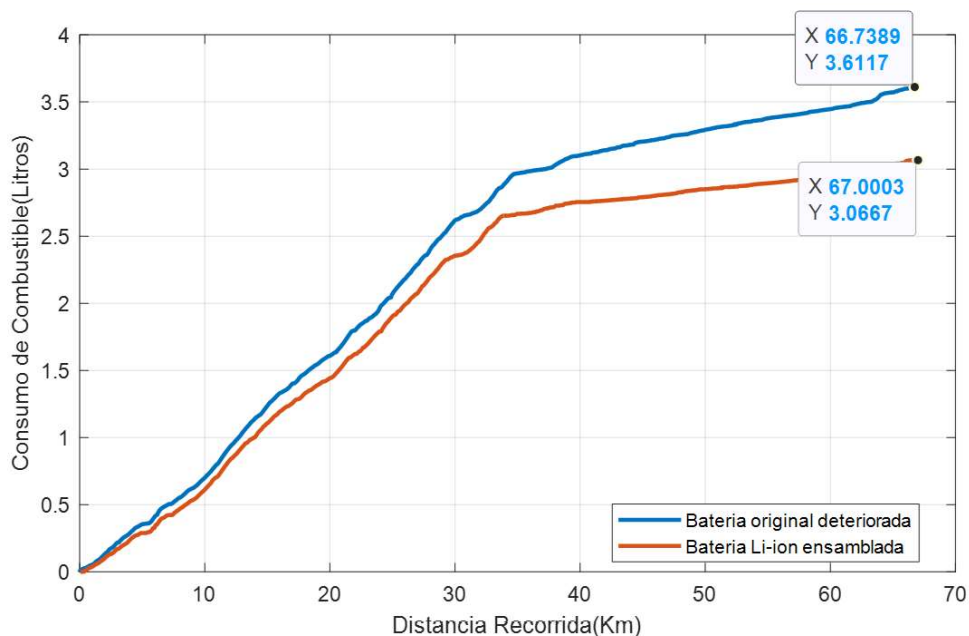


Figura 4.38 Consumo de combustible y distancia recorrida- ruta urbana

- Ruta en un entorno en carretera.

Para este análisis se recorrió una ruta de ida y vuelta desde Cuenca al parque Nacional El Cajas, sector tres cruces, con una distancia total de 67 km aproximadamente, de igual manera se intentó mantener el mismo tipo de conducción en los dos casos.

Como se puede ver en la Figura 4.39, con la batería original del vehículo se obtiene un consumo de 3.62 litros, y con el uso de la batería nueva se obtiene un consumo de 3.07 litros, lo cual representa un ahorro del 15% de la batería nueva en comparación con la batería original. Para este caso se debe tener en cuenta que en carretera el aporte del motor eléctrico es mínimo, en comparación de un entorno urbano.



**Figura 4.39 Consumo de combustible y distancia recorrida - carretera**

Finalmente se calcula el consumo de combustible por cada 100 kilómetros en los dos entornos como son carretera y entorno urbano, obteniendo los siguientes valores mostrados en la Tabla 4.10.

**Tabla 4.10 Consumo de combustible en diferentes entornos**

Consumo combustible	Carretera(67km)		Ruta urbana(19km)	
	Batería Li-ion ensamblada	Batería original deteriorada	Batería Li-ion ensamblada	Batería original deteriorada
(L)	3.07	3.62	0.75554	1.7005
(L/100km)	4.58	5.40	3.98	8.95

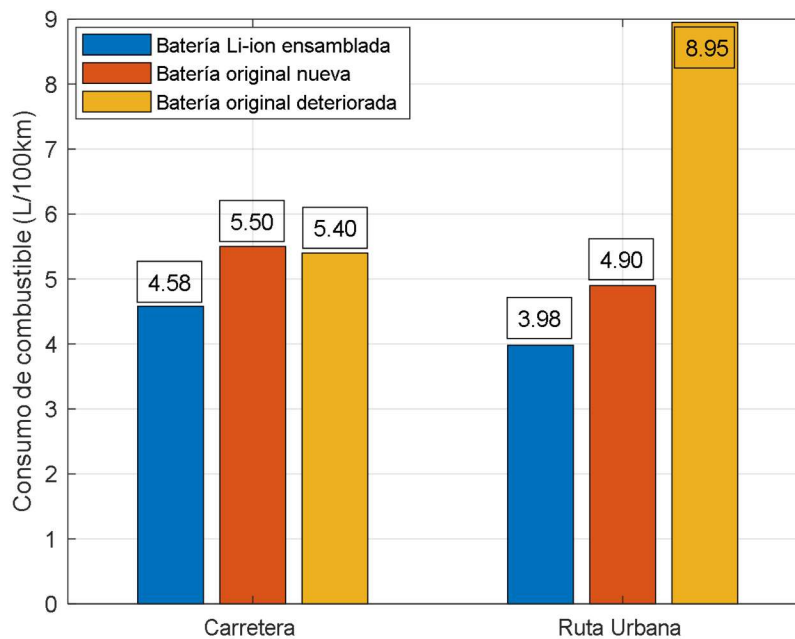


Debido a que el motor a combustión interna tiene una mayor eficiencia en carretera que en un entorno urbano, se obtiene un menor consumo de combustible como se puede observar con la batería original deteriorada en ruta urbana su consumo es de 8.95 L/100km a diferencia de carretera que es 5.40 L/100km.

Con la sustitución de la batería, además de alargar su vida útil, también se intenta reducir el consumo de combustible, obteniendo 3.98 L/100km en un entorno urbano que representa un ahorro del 56% y 4.58 L/100km en carretera que representa un ahorro del 15% (Figura 4.40), esto debido a que el motor eléctrico principalmente se encarga de impulsar el vehículo durante los arranques, y se tiene un mayor aporte de la batería en una ruta urbana. Además, se realiza una comparación con una batería original nueva, la cual tiene las siguientes eficiencias de combustible mostradas en la Tabla 4.11 según los datos técnicos que proveen las fuentes oficiales de Toyota [68].

**Tabla 4.11 Eficiencia de combustible – Batería original nueva**

Eficiencia de combustible – Batería original nueva	
Ciudad - Urbano	4.9 L/100km
Carretera	5.5 L/100km



**Figura 4.40 Consumo de combustible en diferentes entornos**

De igual manera se calcula la autonomía del vehículo estimando un consumo de 30 litros que representa el 83% del tanque que tiene una capacidad de 36 litros, obteniendo las diferentes autonomías mostradas en la Figura 4.41.

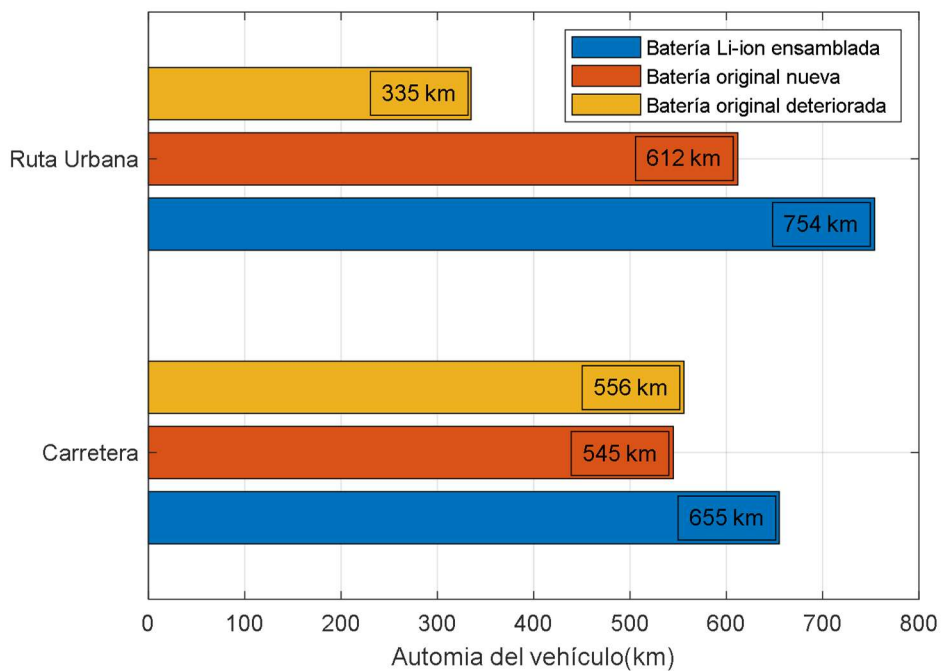


Figura 4.41 Autonomía del vehículo en diferentes entornos



## Capítulo 5: Conclusiones

### 5.1 Conclusiones

La tecnología de baterías de Li-ion nos permitió diseñar un banco de baterías de mayores prestaciones en cuanto a vida útil, respetando los voltajes nominales de cada módulo del sistema de baterías original y teniendo presente en todo momento que las corrientes tanto en carga como en descarga sean abastecidas por las celdas para el nuevo diseño. Siguiendo este mismo procedimiento no solo se puede diseñar bancos para aplicaciones en vehículos EV y HEV, si no también sistemas de almacenamiento de energía para estaciones de telecomunicaciones (centrales de conmutación, centros de datos, estaciones base, etc.), que comúnmente utilizan una solución para el almacenamiento basado en baterías de Plomo-Ácido. Otra opción que permite la conexión en paralelo al aumentar la capacidad de almacenamiento del banco (Ah), es una alternativa para el almacenamiento de energía en sistemas de generación fotovoltaica de uso empresarial o residencial.

Con las distintas pruebas de conducción en las distintas rutas realizadas junto con la adquisición de datos y su posterior tratamiento y análisis nos permitió caracterizar el funcionamiento del vehículo híbrido bajo estudio (Toyota Prius C) y la forma en que su sistema híbrido actúa, para lo cual se puede destacar lo siguiente:

- Los pulsos de corriente presentados en las distintas pruebas indican que el vehículo utiliza la tracción del motor eléctrico en los procesos de arranque del vehículo.
- Al producirse una aplicación del freno, actúa el proceso del frenado regenerativo, en donde el vehículo aprovecha la energía cinética de tal forma que el generador recarga el banco de baterías.
- Cuando el vehículo se encuentra detenido esperando la reanudación del movimiento (detenido en semáforos), el motor IC se apaga por completo, esto hace que no consuma combustible, a diferencia de un vehículo tradicional donde el consumo por ralentí está presente.
- Si el vehículo transita a velocidades menores a los 50 - 60 km/h el motor eléctrico es el encargado de suministrar la tracción necesaria para realizar el movimiento.

El nuevo banco de baterías es de 3.3 kWh triplicando el valor de la energía total del sistema de almacenamiento original que era de 0.936 kWh. Esta mejora se refleja en la vida útil, debido a que cada ciclo de vida de carga y descarga de la batería aporta un mayor número de kilómetros de recorrido, obteniendo una mejora de hasta 118.56% en un entorno urbano y 5.106% en carretera. La idea de sustituir la batería del Toyota Prius C por una batería de mayor capacidad



además de prologar su vida útil en función de kilómetros de recorrido, extiende el modo de conducción puramente eléctrico del vehículo híbrido representando un gran ahorro de combustible de hasta un 56% en un entorno urbano y 15% en carretera.

La diferencia de ahorro de combustible en las distintas rutas de análisis se debe a los perfiles de conducción. En una ruta urbana el vehículo por lo general está sometido a detenciones y arranques más reiterados debido al tráfico (semáforos, intersecciones, señalización, etc.) y por lo general no se superan los 60 Km/h, este perfil permite un alto grado de participación del sistema híbrido (motor/generador eléctrico - inversor - banco de baterías) en la tracción del vehículo. Conforme el sistema híbrido se encuentra en funcionamiento en todo momento el motor IC se encuentra apagado (conducción puramente eléctrica, el motor IC no consume combustible) mientras se produce un ahorro del consumo de combustible. En la ruta en carretera, los niveles de velocidad en ocasiones no superan los 60km/h (tráfico, curvas, regulación de velocidad, etc), por otro lado, al presentarse descensos en la topografía de la ruta, el vehículo aprovecha la aplicación del freno para generar energía debido al proceso de frenado regenerativo, la cual es almacenada en el banco de baterías; este perfil de conducción también pone en funcionamiento al sistema híbrido. Al final luego de varias pruebas realizadas se obtienen tanto los ahorros de combustible presentados como la vida útil del banco de baterías en función de kilómetros de recorrido estimados.

En una la ruta en autopista, en donde generalmente se mantienen velocidades constantes y elevadas (> 80 Km/h para automóviles), se pudo observar en las distintas gráficas obtenidas para el nuevo banco, que el sistema híbrido solo actúa en el frenado regenerativo o en la aplicación del acelerador que ayudan a mantener la velocidad estable.

Dentro del análisis económico y el sondeo de mercado realizado, modelos recientes de Toyota Prius (a partir del 2017) y muchos de los vehículos híbridos de años recientes vienen con sistemas de almacenamiento de energía a base de Li-ion. El motivo por el cual Toyota usaba NiMH, es porque la consideraban una tecnología madura y desarrollada que satisfacía las necesidades y brindaba un ahorro de combustible satisfactorio. Finalmente, los beneficios del desarrollo en tecnologías de baterías de Li-ion, superaron las prestaciones de las baterías de NiMH en términos de energía específica (Wh/Kg) y vida útil (ciclos de carga-descarga). Otras marcas de vehículos en sus líneas de modelos híbridos entraron al mercado cuando la tecnología de Li-ion se encontraba suficientemente madura y por esta razón directamente sus soluciones para los sistemas híbridos son fabricados con tecnología de Li-ion. Los últimos modelos del Toyota presentan soluciones de Li-ion con capacidades similares (~1 kWh) a las soluciones tradicionales de NiMH, con esto la batería HEV mejora en vida útil, ya que las celdas de Li-ion ofrecen ciclos de carga-descarga más grandes.



## 5.2 Trabajos Futuros

Diseñar un BMS en paralelo al BMS del vehículo de tal forma, que la ecualización de voltajes y estados de carga se dé una forma más precisa y se llegue a una ecualización perfecta en menos tiempo, alargando la vida útil del banco de baterías.

Realizar un diseño de la estructura que sostiene el banco de baterías de una manera más precisa (diseños 3D, cortes laser, etc.) para evitar lo máximo posible, daños físicos a las celdas, como también un control térmico más eficiente.

Armar el banco de baterías con un tipo de baterías de Li-ion diferente a las de LFP que se usó en el trabajo experimental, con el objetivo de realizar una comparación tanto a nivel de desempeño como de presupuestos.



# Anexos



## Anexo A

# Análisis Económico



A.1 Costo de batería original

		<b>TOYOCUENCA S.A.</b> AV. GIL RAMIREZ DÁVALOS 3-90 RUC: 0190156257001 Telf.: 2609618 CITAS: 072862374		<b>PROFORMA NRO. MEC 7776</b>		Se le comunicó al cliente sobre los detalles de la reparación?	
Fecha: 21/01/2020		Asesor de Servicio: TOBAR CANDO CARLOS PATRICIO		CI/RUC: 0105175038		Telf. Dom.: 999009116	
Dirección: JUAN JARAMILLO 3-60		E-mail: xavier.reiban@hotmail.com		Telf. Cel.: 0999009116		Telf. Ofic.:	
Cía. Seguro: Dirección:		CI/RUC:		Teléfono:			
VIN	Motor	Modelo de Vehículo	Año	Color	Placa	Kilometraje	
JTDKD3B35E-1555663	1NZFXE	AA PRIUS C	2014	AZUL	PCC7966	160000	
<b>MECANICA</b>							
Item	Lado	Código	Descripción			Precio Total	
1		159632	CAMBIO BATERIA HIBRIDA			420,00	
2		895992	REVISION AUTODIAGNOSTICO			58,80	
						Subtotal Mecánica	
						478,80	
<b>REPUESTOS</b>							
Item	Cantidad	Descripción	Disponibilidad	Precio Unitario	Precio Total		
<b>Toyota</b>							
1	1,00	BATERIA HIBRIDA PRIUS C	TDE (22/01/20)	1.600,00	1.600,00		
						Subtotal Repuestos	
						1.600,00	
						Subtotal Repuestos Toyota	
						1.600,00	
						Dto. Repuestos Toyota	
						0,00	
						Subtotal Repuestos Hino	
						0,00	
						Dto. Repuestos Hino	
						0,00	
						Subtotal Repuestos Terceros	
						0,00	
						Dto. Repuestos Terceros	
						0,00	
						Subtotal Mano de Obra	
						478,80	
						Dto. Mano de Obra	
						0,00	
						Subtotal Terceros	
						0,00	
						Valor Insumo	
						3,00	
						<b>SUBTOTAL 12%</b>	
						<b>481,80</b>	
						<b>SUBTOTAL 0%</b>	
						<b>1.600,00</b>	
						<b>SUBTOTAL</b>	
						<b>2.081,80</b>	
						<b>IVA 12,00 %</b>	
						<b>57,82</b>	
						<b>TOTAL DEL TRABAJO</b>	
						<b>2.139,62</b>	

OBSERVACIONES:  
NOTA: ESTA PROFORMA PUEDE ESTAR SUJETA A CAMBIOS. TIEMPO DE VALIDEZ: 8 DIAS



CLIENTE  
AUTORIZA REALIZACIÓN DE TRABAJO

Figura A.1 Cotización de batería original





**A.2 Costo de ensamblaje a partir de polímero Li-ion del tipo LFP.**

**Tabla A.1 Costos de Importación**

<b>Descripción</b>	<b>Subtotal</b>	<b>IVA</b>	<b>Total</b>
52 celdas de 3.2V 20Ah	\$732.68	\$87.92	\$820.60
Transporte marítimo	\$142.00	\$17.04	\$159.04
Agente de aduana	\$240.00	\$28.80	\$268.80
Almacenaje Tarifa Mínima	\$20.00	\$2.40	\$22.40
Servicio de Tarja	\$12.00	\$1.44	\$13.44
Despacho de Carga Suelta	\$3.00	\$0.36	\$3.36
Certificado digital de Firma Electrónica	\$49.00	\$5.88	\$54.88
<b>Total</b>			<b>\$1,342.52</b>



Tabla A.2 Costos de construcción

Descripción	Subtotal	IVA	Total
Tabla de plástico	\$13.39	\$1.61	\$15.00
Barniz dieléctrico	\$8.93	\$1.07	\$10.00
Caucho aislante	\$2.68	\$0.32	\$3.00
Tornillos, arandelas y tuercas	\$5.36	\$0.64	\$6.00
Pintura en aerosol	\$1.79	\$0.21	\$2.00
Cinta aislante y embalaje	\$4.46	\$0.54	\$5.00
Disolvente	\$0.89	\$0.11	\$1.00
Escuadra	\$0.89	\$0.11	\$1.00
Cable AWG #18	\$2.68	\$0.32	\$3.00
Tubo termo retráctil	\$1.79	\$0.21	\$2.00
Terminales planos	\$1.79	\$0.21	\$2.00
Cable AWG #6 doble recubrimiento	\$2.68	\$0.32	\$3.00
Terminales planos para cable #6	\$1.79	\$0.21	\$2.00
<b>Total</b>			\$55.00

## Anexo B

# Mediciones adicionales del nuevo banco de baterías

### B.1 Medición de resistencia interna de celdas.

En el proceso constructivo se utilizó el dispositivo Fluke BT521 Advanced Battery Analyzer que se muestra en la Figura B.1, este nos permite obtener el valor de la resistencia interna de las celdas tanto individualmente como al momento de realizar las conexiones en serie para formar los módulos. De esta manera al tener una resistencia interna reducida podemos asegurar que no existirá pérdidas de potencia o procesos de auto descarga elevados, presentes cuando dicha resistencia interna es elevada.

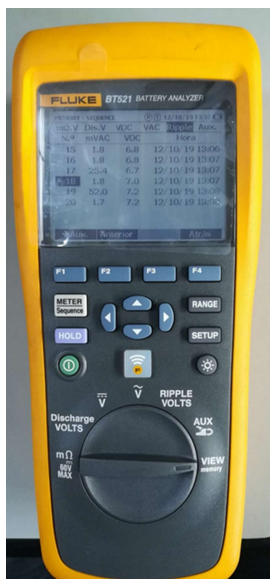


Figura B.1 Fluke BT521 Advanced Battery Analyzer

Usando esta herramienta se pudo numerar, identificar y registrar todas las resistencias internas de las celdas al momento de su compra, los resultados se muestran en la Tabla B.1



Tabla B.1 Registro de resistencia interna y voltaje nominal de todas las celdas para el nuevo banco de baterías

ID celda	Resistencia Interna ( $m\Omega$ )	VDC
1	0,8	3,333
2	0,77	3,349
3	0,78	3,344
4	0,79	3,34
5	0,76	3,341
6	0,83	3,344
7	0,83	3,341
8	0,78	3,351
9	1,03	3,327
10	0,78	3,328
11	0,8	3,339
12	0,8	3,342
13	0,75	3,331
14	0,8	3,33
15	0,77	3,339
16	0,78	3,329
17	0,85	3,329
18	0,85	3,33
19	1,08	3,328
20	1,11	3,327
21	1,1	3,327



22	0,79	3,336
23	0,98	3,329
24	1,04	3,33
25	1,01	3,327
26	1,01	3,327
27	0,96	3,35
28	0,96	3,242
29	0,87	3,332
30	0,9	3,331
31	0,86	3,333
32	0,99	3,329
33	0,79	3,337
34	1,02	3,328
35	1,02	3,329
36	0,77	3,341
37	0,79	3,339
38	0,84	3,34
39	0,79	3,329
40	0,88	3,328
41	0,83	3,342
42	0,84	3,351
43	0,84	3,341
44	0,81	3,343
45	0,85	3,341
46	0,79	3,34



47	0,82	3,341
48	0,85	3,34
49	0,83	3,34
50	0,82	3,353

## B.2 Medición de resistencia interna de módulos.

En el proceso de armado de los módulos, nuevamente se usó el analizador de baterías Fluke BT521 Advanced Battery Analyzer, para asegurarnos que la resistencia interna de las baterías y las uniones entre ellas permanezcan lo más bajo posible.

Los valores de las resistencias de cada módulo junto con los voltajes nominales en DC se muestran en la Tabla B.2.

**Tabla B.2 Registro de resistencia y voltaje en DC para todos los módulos del nuevo banco de baterías**

ID Modulo	VDC(V)	Resistencia(m $\Omega$ )
M1(1-5)	16.707	5.53
M2(6-10)	16.691	7
M3(11-15)	16.681	5.82
M4(16-20)	16.643	6.43
M5(21-25)	16.649	6.54
M6(26-30)	16.689	6.26
M7(31-35)	16.656	6.76
M8(36-40)	16.677	5.46
M9(41-45)	16.718	7.06
M10(46-50)	16.714	5.91



Desde este proceso de armado ya se puede observar una mejora significativa frente a los módulos originales los cuales presentan una resistencia de  $19.2 \text{ m}\Omega$  ( $9.6 \text{ m}\Omega$  de cada celda individual) frente a un máximo de  $7.06 \text{ m}\Omega$  que se obtuvieron con el armado de los módulos.



## Bibliografía

- [1] D. Streimikiene, T. Baležentis, and L. Baležentienė, “Comparative assessment of road transport technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 611–618, 2013.
- [2] D. Abbott, “Keeping the energy debate clean: How do we supply the world’s energy needs?,” *Proc. IEEE*, vol. 98, no. 1, pp. 42–66, 2010.
- [3] D. A. Niemeier *et al.*, “Transportation,” *Assess. Clim. Chang. Southwest United States A Rep. Prep. Natl. Clim. Assess.*, no. June, pp. 297–311, 2013.
- [4] D. Howell, “Annual progress report for energy storage R&D,” *Veh. Technol. Program, Energy Effic. Renew. Energy, U.S. Dep. Energy, Washington, DC*, 2011.
- [5] A. G. Boulanger, A. C. Chu, S. Maxx, and D. L. Waltz, “Vehicle electrification: Status and issues,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1116–1138, 2011.
- [6] D. Corrigan and A. Masias, *Batteries for electric and hybrid vehicles. In: Reddy TB*. 2011.
- [7] D. Streimikiene and A. Mikalauskiene, “Comparative Assessment of Sustainable Energy Development in the Czech Republic, Lithuania and Slovakia,” *J. Compet.*, vol. 8, no. 2, pp. 31–41, 2016.
- [8] Y. Masuda, “Toyota’s Fuel Cell Vehicle Achievements and Pathway to Commercialization,” 2010.
- [9] L. Kumar and S. Jain, “Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 924–940, 2014.
- [10] C. C. Chan, A. Bouscayrol, and K. Chen, “Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 2, pp. 589–598, 2010.
- [11] S. S. Williamson and A. Emadi, “Comparative assessment of hybrid electric and fuel cell vehicles based on comprehensive well-to-wheels efficiency analysis,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 3, pp. 856–862, 2005.
- [12] R. Garcia-Valle and J. A. Pecas Lopes, *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks, Power Electronics and Power Systems*, 1st ed. New York: Springer, 2013.
- [13] L. Vimmerstedt, “Using Natural Gas for Vehicles: Comparing Three Technologies,” *US Dep. Energy, Energy Effic. Renew. Energy*, pp. 1–4, 2015.
- [14] A. Khaligh and L. Zhihao, “Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: state of the art.,” *IEEE Trans Veh. Technol.*, vol. 59, pp. 2806–2814, 2010.
- [15] B. Scrosati, J. Garche, and W. Tillmetz, *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, 1st ed. Woodhead Publishing, 2015.





- [16] J. G. Hayes and G. A. Goodarzi, *Electric Powertrain, Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles*, 1st Ed. Wiley & Sons Ltd, 2018.
- [17] R. Xiong and W. Shen, *Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles*. Wiley & Sons Ltd, 2019.
- [18] B. Isidor and Cadex Electronics Inc., “Discharging at High and Low Temperatures – Battery University,” 2019. [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/discharging\\_at\\_high\\_and\\_low\\_temperature](https://batteryuniversity.com/learn/article/discharging_at_high_and_low_temperature). [Accessed: 04-Dec-2019].
- [19] Kwo, Caisheng, Le, and Kai, *Power Electronics and Power Systems*. 2013.
- [20] H. Berg, *Batteries for Electric Vehicles-Materials and Electrochemistry*. UK: Cambridge University Press, 2015.
- [21] D. Pavlov, *Lead-Acid Batteries: Science and Technology*. Elsevier, 2011.
- [22] J. Matheys, J. Van Mierlo, J.-M. Timmermans, and P. Van den Bossche, “Life-cycle assessment of batteries in the context of the EU Directive on end-of-life vehicles,” *Int. J. Veh. Des.*, vol. 46, pp. 189–203, 2008.
- [23] S. Manzetti and F. Mariasiu, “Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1004–1012, 2015.
- [24] T. Horiba, “Lithium-ion battery systems,” *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 1–12, 2014.
- [25] C. E. I. Isidor Buchmann, “Types of Lithium-ion Batteries – Battery University,” 2019. [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion). [Accessed: 20-Nov-2019].
- [26] W. Mitchell, “Large format nanophosphate batteries for telecommunication and data center UPS applications,” in *29th International Battery Seminar*, 2012, pp. 12–15.
- [27] N. Takami, H. Inagaki, Y. Tatebayashi, H. Saruwatari, K. Honda, and S. Egusa, “High-power and long-life lithium-ion batteries using lithium titanium oxide anode for automotive and stationary power applications,” *J. Power Sources*, vol. 244, pp. 469–475, Dec. 2013.
- [28] H. Liu, Z. Wei, W. He, and J. Zhao, “Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 150, pp. 304–330, Oct. 2017.
- [29] R. Xiong, J. Tian, H. Mu, and C. Wang, “A systematic model-based degradation behavior recognition and health monitoring method for lithium-ion batteries,” *Appl. Energy*, vol. 207, pp. 372–383, Dec. 2017.
- [30] Y. Shen, “Adaptive online state-of-charge determination based on neuro-controller and neural network,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 5, pp. 1093–1098, May 2010.



- [31] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation," *J. Power Sources*, vol. 134, no. 2, pp. 277–292, Aug. 2004.
- [32] X. Hu, F. Sun, and Y. Zou, "Estimation of State of Charge of a Lithium-Ion Battery Pack for Electric Vehicles Using an Adaptive Luenberger Observer," *Energies*, vol. 3, no. 9, pp. 1586–1603, Sep. 2010.
- [33] Jun Xu, C. C. Mi, Binggang Cao, Junjun Deng, Zheng Chen, and Siqu Li, "The State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Based on a Proportional-Integral Observer," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 4, pp. 1614–1621, May 2014.
- [34] Q. Yu and C. Lin, "Online Estimation of State-of-charge Based on the H infinity and Unscented Kalman Filters for Lithium Ion Batteries," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2791–2796, May 2017.
- [35] I.-S. Kim, "The novel state of charge estimation method for lithium battery using sliding mode observer," *J. Power Sources*, vol. 163, no. 1, pp. 584–590, Dec. 2006.
- [36] E. Nelsen, "Vehículos eléctricos híbridos y enchufables," p. 4, 2015.
- [37] A. Kurt, U. Dolu, B. Kaya, and G. Poyrazoglu, "Design of the Circuitry, Battery Management System, and Wireless Communication of an Electric Vehicle," *Proc. - 2019 IEEE 1st Glob. Power, Energy Commun. Conf. GPECOM 2019*, pp. 233–237, 2019.
- [38] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 226, pp. 272–288, Mar. 2013.
- [39] L. T. Corporation, "Linear Technology Corporation. LTC6803-3 datasheet," 2011. [Online]. Available: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/680313fa.pdf>. [Accessed: 08-Dec-2019].
- [40] M. M. Hoque, M. A. Hannan, A. Mohamed, and A. Ayob, "Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. May, pp. 1363–1385, 2017.
- [41] M. Daowd, N. Omar, P. Van Den Bossche, and J. Van Mierlo, "Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation," in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011, pp. 1–7.
- [42] K. J. Kelly, M. Mihalic, and M. Zolot, "Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight during chassis dynamometer testing," in *Seventeenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of Conference (Cat. No.02TH8576)*, pp. 247–252.
- [43] Hankwang, "IUoU charging graph," 2015. [Online]. Available:



- [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IUoU\\_charging\\_graph.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IUoU_charging_graph.png). [Accessed: 08-Jan-2020].
- [44] K. Ogura and M. L. Kolhe, “Battery technologies for electric vehicles,” in *Electric Vehicles: Prospects and Challenges*, Elsevier, 2017, pp. 139–167.
- [45] G. Ning, B. Haran, and B. N. Popov, “Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates,” *J. Power Sources*, vol. 117, no. 1–2, pp. 160–169, May 2003.
- [46] J. R. Belt, C. D. Ho, C. G. Motloch, T. J. Miller, and T. Q. Duong, “A capacity and power fade study of Li-ion cells during life cycle testing,” *J. Power Sources*, vol. 123, no. 2, pp. 241–246, Sep. 2003.
- [47] J. Shim, R. Kosteki, T. Richardson, X. Song, and K. . Striebel, “Electrochemical analysis for cycle performance and capacity fading of a lithium-ion battery cycled at elevated temperature,” *J. Power Sources*, vol. 112, no. 1, pp. 222–230, Oct. 2002.
- [48] M.-S. Wu and P.-C. J. Chiang, “High-rate capability of lithium-ion batteries after storing at elevated temperature,” *Electrochim. Acta*, vol. 52, no. 11, pp. 3719–3725, Mar. 2007.
- [49] A123 Energy Solutions, *Battery Pack Design, validation, and assembly guide using A123 Systems AMP20mlHD-A Nanophosphate Cells*. 2014.
- [50] X. Feng *et al.*, “Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry,” *J. Power Sources*, vol. 255, pp. 294–301, Jun. 2014.
- [51] Z. An, K. Shah, L. Jia, and Y. Ma, “Modeling and analysis of thermal runaway in Li-ion cell,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 160, p. 113960, Sep. 2019.
- [52] R. Zhao, S. Zhang, J. Liu, and J. Gu, “A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system,” *J. Power Sources*, vol. 299, pp. 557–577, Dec. 2015.
- [53] T. Blank, J. Badedo, J. Kowal, and D. Uwe, “Deep Discharge Behavior of Lead-Acid Batteries and Modeling of Stationary Battery Energy Storage Systems,” pp. 54–57, 2012.
- [54] F. Augeri, “Estado de carga SOC (State of charge),” pp. 11–13, 2019.
- [55] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu, “A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications,” *J. Power Sources*, vol. 241, pp. 680–689, Nov. 2013.
- [56] K. Asakura, M. Shimomura, and T. Shodai, “Study of life evaluation methods for Li-ion batteries for backup applications,” *J. Power Sources*, vol. 119–121, pp. 902–905, Jun. 2003.
- [57] © Toyota Motor Corporation, “Hybrid 2012 Model: Emergency Response Guide,” 2012.



- [58] F. Gómez Calapaqui and D. Hidalgo Chasi, “Diseño y construcción de un banco de pruebas genérico, para reparación y mantenimiento de baterías híbridas,” Universidad de las Fuerzas Armadas, 2014.
- [59] J. S. Jhou, S. H. Chen, W. Der Tsay, and M. C. Lai, “The implementation of OBD-II vehicle diagnosis system integrated with cloud computation technology,” *Proc. - 2013 2nd Int. Conf. Robot. Vis. Signal Process. RVSP 2013*, pp. 9–12, 2013.
- [60] T. Miller, “OBD2 Technology: The Definite Interpretation,” *OBD Solaris*, 2019. [Online]. Available: <https://obdsolaris.com/obd2-technology-definite-interpretation/>. [Accessed: 03-Jan-2020].
- [61] J. Carrizo Sánchez, “Simulador de una ECU y diagnóstico mediante CAN y OBD-II,” Universidad de Castilla-La Mancha, 2017.
- [62] A. Martínez Requena, “Introducción a CAN bus: Descripción, ejemplos y aplicaciones de tiempo real,” Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
- [63] S. Corrigan, “Introduction to the Controller Area Network (CAN) Application Report Introduction to the Controller Area Network (CAN),” no. May, pp. 1–17, 2002.
- [64] MathWorks Inc., “trapz,” 2020. [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/trapz.html>. [Accessed: 20-Jan-2020].
- [65] Toyota of Downtown LA, “What’s the Warranty on a Toyota Battery?,” *Hybrid Technology, Service, Toyota*, 2018. [Online]. Available: <https://www.toyotaofdowntownla.com/whats-the-warranty-on-a-toyota-battery/>. [Accessed: 22-Jan-2020].
- [66] “How to calculate the fuel consumption of hybrid vehicles????”, ResearchGate. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/post/How\\_to\\_calculate\\_the\\_fuel\\_consumption\\_of\\_hybrid\\_vehicles](https://www.researchgate.net/post/How_to_calculate_the_fuel_consumption_of_hybrid_vehicles). [Accessed: 09-mar-2020].
- [67] “Baterías de tracción para aplicaciones EV y HEV.” [Online]. Available: <https://www.mpoweruk.com/traction.htm>. [Accessed: 09-Mar-2020].
- [68] “2018 Toyota Prius c Specifications - The Car Guide.” [Online]. Available: <https://www.guideautoweb.com/en/makes/toyota/prius-c/2018/specifications/base/>. [Accessed: 02-Mar-2020].