



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Modelado y simulación de baterías en autos eléctricos

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Agustín Irurueta, Juan Lima, Nicolás Moreno

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA.

TUTOR

Ing. Federico Arismendi Universidad de la República
Ing. Juan Pedro Carriquiry Universidad de la República
Dr. Ing. Mario Vignolo Universidad de la República

TRIBUNAL

Dra. Érika Téliz Universidad de la República
Ing. Diego Oroño Universidad de la República
Ing. Federico González Universidad de la República

Montevideo
30 de octubre de 2020

Modelado y simulación de baterías en autos eléctricos, Agustín Irurueta, Juan Lima, Nicolás Moreno.

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).
Contiene un total de 188 páginas.
Compilada el miércoles 30 diciembre, 2020.
<http://iie.fing.edu.uy/>

“ Cuando el último árbol sea cortado, el último río envenenado, el último pez pescado, sólo entonces el hombre descubrirá que el dinero no se come.”

PROVERBIO CREE

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Agradecimientos

A todas aquellas personas que nos acompañaron en este camino ayudando a sortear las dificultades que se nos presentaron sin importar la naturaleza y complejidad de las mismas.

Especialmente queremos agradecer al Ing. Alejandro Gigena, quién nos ayudó a despejar las dudas que surgieron en cuanto la programación del software.

A Rosario Irurueta, por todas las horas de lectura invertidas en este documento.

Al Ing. Federico Ragni, encargado de conducir el vehículo eléctrico aportado por UTE y que amablemente nos aclaró varias interrogantes acerca del tema estudiado.

A los Tutores, Ing. Juan Pedro Carriquiry, Ing. Federico Arismendi y Dr. Ing. Mario Vignolo, por el apoyo brindado más allá de lo académico, a lo largo de la realización del proyecto.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

A través de los años la sociedad de consumo ha llevado al medio ambiente a su deterioro. El calentamiento global es una realidad con la que convivimos y poco se hace para revertir ese fenómeno. Con el fin de llevar a cabo un desarrollo en masa de productos de confort para la sociedad se han implementado técnicas y tecnologías poco amigables con el ambiente. Unos de los principales contaminantes hoy en día es el combustible fósil; existen millones de vehículos en todo el mundo que funcionan en base al mismo generando una de las principales causas de la contaminación del planeta.

El creciente desarrollo en nuevas tecnologías abre la puerta a energías limpias y formas de transporte alternativas como son los vehículos eléctricos. Pero las nuevas tecnologías traen consigo diversas interrogantes y problemas a abordar. La principal limitación que se presenta en el uso de autos eléctricos son las baterías, por lo tanto, con el fin de insertar los vehículos eléctricos en el mercado actual se hace imperativo el análisis de las mismas.

Dicho lo anterior, el tema central de esta tesis es el estudio y modelado de baterías en autos eléctricos, a partir de los cuales hemos desarrollado un software que permite evaluar el desempeño y rendimiento de estos vehículos. Se cree firmemente que esta herramienta servirá como base para interiorizar aspectos técnicos necesarios para desarrollos posteriores en materia de vehículos eléctricos, los cuales permitan acompañar los avances tecnológicos que surjan con el paso del tiempo. A su vez, esta herramienta será capaz de despejar dudas sobre el comportamiento de estos vehículos para un futuro usuario interesado en el cambio a la movilidad eléctrica.

Acrónimos

ANCAP Administración Nacional de Combustibles Alcohol y Portland.

API Interfaz de programación de aplicaciones (Application Programming Interface).

BMS Sistema de gestión de batería (Battery management system).

DoD Profundidad de descarga.

KERS Sistema de recuperación de energía cinética (Kinetic Energy Recovery System).

LFP Litio hierro fosfato.

NCA Óxido de litio níquel cobalto aluminio.

NEDC Nuevo ciclo de conducción europeo (New European Driving Cycle).

NMC Óxido de litio níquel manganeso cobalto.

OCV Tensión de circuito abierto (Open circuit voltage).

SAVE Sistema de alimentación de vehículos eléctricos.

SOA Área de operación segura (Safe operation area).

SOC Estado de carga (State of charge).

SOH Estado de salud (State of Health).

SSAA Servicios Auxiliares.

UTE Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas.

VE Vehículo eléctrico.

WLTP Procedimientos de pruebas de vehículos ligeros coordinados a nivel mundial (World Harmonized Light-duty Vehicle Test Procedure).

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	III
Resumen	V
Acrónimos	VII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Motivación	1
1.3. Objetivos del proyecto	2
1.4. Metodología de trabajo	3
2. Vehículos en la actualidad	5
2.1. Vehículos a combustión interna	5
2.2. Vehículos híbridos	7
2.2.1. Ventajas del vehículo híbrido	7
2.3. Vehículos eléctricos	8
2.3.1. Impacto en el medio ambiente	9
2.4. Evolución del vehículo electrificado	10
3. Conceptos del vehículo eléctrico	11
3.1. Estructura básica de un vehículo eléctrico	11
3.1.1. Motor eléctrico	11
3.1.2. Batería principal	12
3.1.3. Cargador	12
3.1.4. Inversor DC/AC	12
3.1.5. Batería auxiliar	12
3.1.6. Conversor DC/DC	12
3.2. Ciclo de conducción	13
3.2.1. NEDC - New European Driving Cycle	13
3.2.2. WLTP - Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure	14
3.3. Principio de funcionamiento de baterías de Ion-Litio y tipos de químicas.	17
3.4. Tipos de celdas	20
3.4.1. Celdas cilíndricas	20
3.4.2. Celdas prismáticas	21

Tabla de contenidos

3.4.3. Celdas laminadas (Pouch)	22
3.4.4. Pack de celdas	22
3.5. Parámetros que caracterizan el comportamiento de las baterías . . .	23
4. Estudio de la resistencia interna y modelo eléctrico de la batería	27
4.1. Caracterización de la resistencia interna	27
4.2. Degradación de la celda de una batería	28
4.2.1. Efectos del aumento de la resistencia interna	28
4.2.2. Degradación por ciclado	29
4.2.3. Degradación por edad	30
4.3. Influencia de la temperatura en la resistencia interna	31
4.4. Influencia del estado de carga en la resistencia interna	32
4.5. Modelo de resistencia interna de la batería	33
5. Influencia de los tipos de carga en la batería	35
5.1. Estrategia de recarga de la batería	35
5.2. Potencia de carga de las baterías	36
5.3. Degradación de las baterías al variar el tipo de carga	38
6. Estado de Salud de la batería - SOH	39
6.1. Definición de SOH	39
6.2. Degradación por edad	40
6.3. Degradación por ciclado	41
7. Frenado Regenerativo	45
7.1. Diferencia entre frenado mecánico y regenerativo	45
7.2. Funcionamiento del frenado regenerativo	46
7.3. Beneficios del frenado regenerativo	48
7.4. Limitaciones del frenado regenerativo	48
8. Estudio de los BMS	49
8.1. Definición de BMS	49
8.2. Limitaciones impuestas a la batería	50
8.3. Efectos en la batería por trabajar fuera del SOA	52
8.4. Control de corriente de carga de la batería	53
8.5. Control de corriente de descarga de la batería	54
8.6. Modelo térmico de la batería	55
8.6.1. Transferencia de calor por convección	55
9. Implementaciones realizadas	57
9.1. Degradación de la celda de una batería	57
9.1.1. Factor degradación por ciclado	57
9.1.2. Factor degradación por edad	59
9.1.3. Bloques implementados en Simulink	60
9.2. Estimación del estado de salud de las baterías - SOH	62
9.2.1. Algoritmo de SOH	62

9.2.2.	Influencia de los tipos de carga	65
9.3.	Frenado Regenerativo	67
9.3.1.	Ajuste de la energía regenerada	67
9.4.	Inclusión del Vehículo Genérico	71
9.4.1.	Aspectos generales del vehículo genérico	71
9.4.2.	Modelado del vehículo genérico	72
9.5.	Inclusión del trayecto dinámico	76
9.5.1.	Visualización de mapas georeferenciados	76
9.5.2.	Distancia del trayecto deseado	77
9.5.3.	Cálculo del consumo	77
9.5.4.	Tarifas eléctricas	78
9.6.	Inclusión del sistema de control de la batería - BMS	79
9.6.1.	Calentamiento de la batería	79
9.6.2.	Transferencia de calor por convección	80
9.6.3.	Sistema de ventilación forzada	81
9.6.4.	Modelo térmico de la batería	82
9.6.5.	Precalentamiento	83
9.6.6.	Variación de temperatura en la batería	84
9.6.7.	Limitantes para la corriente máxima de la batería	85
10.	Ensayo de un vehículo eléctrico en ruta	87
10.1.	Ensayo realizado:	87
10.1.1.	Características del vehículo utilizado	87
10.1.2.	Condiciones iniciales del ensayo	88
10.1.3.	Detalles del recorrido	89
10.2.	Datos a Registrar	89
10.3.	Resultados del ensayo	90
10.3.1.	Datos obtenidos de la computadora a bordo del vehículo	90
10.3.2.	Datos extraídos del SAVE	91
11.	Validación del modelo desarrollado	93
11.1.	Ensayo en ruta	93
11.1.1.	Análisis de resultados	93
11.1.2.	Simulación del ciclo de ruta	94
11.2.	Datos aportados por terceros	99
11.2.1.	Autonomías en ciclos WLTP y NEDC	100
11.2.2.	Vida Útil de la batería	101
11.2.3.	Vehículo genérico	102
11.2.4.	Trayecto Dinámico	104
12.	Resultados del modelo desarrollado	105
12.1.	Comparativa entre vehículo nuevo y usado	105
12.1.1.	Comportamiento de la resistencia interna	105
12.1.2.	Comportamiento del SOC	107
12.1.3.	Comportamiento de la temperatura de la batería	107

Tabla de contenidos

12.2. Comportamiento del SOH de la batería ante la variación de la potencia de carga	109
12.3. Actuación del BMS para la operación a temperaturas dentro de la zona de operación segura	111
12.3.1. Límite superior del SOA	111
12.3.2. Límite inferior del SOA	112
13. Conclusiones	115
13.1. Modelo desarrollado	115
13.1.1. Resistencia interna de la batería	115
13.1.2. Estado de salud de la batería - SOH	116
13.1.3. Frenado Regenerativo	116
13.1.4. Inclusión del Vehículo Genérico	117
13.1.5. Trayecto Dinámico	117
13.1.6. Sistema de gestión de batería - BMS	117
13.2. Ciclo de conducción en ruta	118
14. Implementaciones futuras	119
14.1. Inclusión de super condensadores al modelo	119
14.2. Adaptación del software a vehículos híbridos	119
14.3. Ómnibus eléctricos	119
15. Guía del software para el usuario	121
15.1. Pasos iniciales	121
15.2. Simular ciclo de conducción	123
15.2.1. Vehículo genérico	127
15.2.2. Trayecto dinámico	128
15.2.3. Cambiar parámetros	132
15.3. SOH - Estado de salud de la batería	135
15.4. Simular carga y descarga del vehículo con la red	137
15.5. Visualizaciones	139
15.6. Comparar vehículos	141
A. Infraestructura de recarga en Uruguay	145
B. Conversión de ciclo NEDC a ciclo WLTP	149
C. Comparativa económica entre vehículos eléctricos y a combustión	151
C.1. Tarifa para vehículos eléctricos	152
C.2. Costo del combustible	152
C.3. Costo de adquisición de ambos vehículos	152
C.4. Incentivo para la movilidad eléctrica en Uruguay	153
C.5. Mantenimiento en vehículos eléctricos	154
C.6. Comparación de consumos	155
Referencias	157

Tabla de contenidos

Índice de tablas	165
Índice de figuras	167

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo fue desarrollado en cumplimiento de los requerimientos para la aprobación de la asignatura “Proyecto de Final de Carrera”, enmarcada en la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

1.1. Antecedentes

Este proyecto se centra en el desarrollo e implementación de un software de simulado de vehículos eléctricos. La base del estudio es un proyecto previamente desarrollado el cual se pretende profundizar. El mismo se titula “Baterías en vehículos eléctricos conectados a la red BeV2G” [1].

1.2. Motivación

En los últimos años los fabricantes de automóviles han puesto la mirada en el futuro, apostando fuertemente al desarrollo de modelos impulsados completamente por motores eléctricos. La mayoría de estos modelos utilizan baterías de Litio como forma de almacenamiento de energía. El valor económico de las mismas representa una porción muy significativa del coste global del vehículo generando la necesidad de estimar con mayor precisión su comportamiento en el futuro.

Debido a las restricciones impuestas a los vehículos de combustión por gobiernos de distintos países, la venta de automóviles enchufables crece año a año. Estas limitaciones se deben a los altos niveles de emisiones de gases contaminantes que producen los vehículos impulsados a combustibles fósiles. Un ejemplo de esto es la impuesta por el gobierno español, decretando que a partir del año 2023 estará prohibido transitar en el centro de las ciudades de más de 50.000 habitantes en un vehículo a combustión [2].

Cada vez son más los modelos de vehículos 100 % eléctricos a los que un usuario puede acceder. El elevado valor que poseen comparados con los vehículos tradicionales a combustión y la falta de información o experiencia por parte del posible comprador, pueden generarle incertidumbre a la hora de plantearse adquirir este

Capítulo 1. Introducción

tipo de transporte. Por esta razón, una herramienta de simulación que sea capaz de recrear el comportamiento de un automóvil eléctrico en circunstancias habituales, contemplando los efectos de la degradación del mismo, es de gran utilidad para despejarle inquietudes.

1.3. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es la confección de un software que simule el desempeño de distintos autos eléctricos en condiciones de uso habitual. Se busca la implementación de una serie de mejoras al trabajo base que doten a éste de una mayor amplitud sobre la influencia de los factores externos, así como también la suma de nuevas utilidades al programa.

A continuación se detallan los objetivos específicos buscados a implementar sobre el proyecto base:

- Estudio de la resistencia interna en baterías de Litio e implementación de mejoras en su modelo, haciendo hincapié en la degradación de la misma.
- Influencia de distintos factores en la pérdida de capacidad de la batería.
- Implementación de un nuevo algoritmo de estimación del estado de salud de la batería (SOH).
- Estudio del impacto de las distintas formas de carga en el deterioro de las baterías.
- Inclusión de nuevos modelos de vehículos eléctricos y de un nuevo ciclo de conducción en ruta.
- Inclusión por parte del usuario un vehículo genérico.
- Estudio e implementación de un sistema de gestión de la batería (BMS).
- Estudio del frenado regenerativo y regulación de su efecto en el consumo de los vehículos.
- Inclusión de un trayecto dinámico a elección del usuario.

1.4. Metodología de trabajo

La primer etapa de desarrollo de este trabajo consistió en el análisis y comprensión del proyecto base. Luego, tomando como referencia diferentes artículos científicos se realizó un estudio de temas enfocados a los objetivos anteriormente mencionados.

El software implementado permite la interacción con el usuario, posibilitando la evaluación de distintos vehículos eléctricos en diferentes recorridos. La implementación del mismo se realizó con las herramientas MATLAB y Simulink.

Para concluir, como forma de validar ciertas implementaciones de nuestro trabajo, se efectuó una prueba de campo la cual consistió en realizar un recorrido en ruta con un auto eléctrico real, para posteriormente analizar los resultados obtenidos.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 2

Vehículos en la actualidad

Durante el último siglo, la movilidad se basa casi exclusivamente en vehículos con motor de combustión interna, los cuales funcionan a partir de derivados de petróleo. De los 900 millones de vehículos que circulan alrededor del mundo, más del 90 % utilizan derivados del petróleo para hacer funcionar sus motores, estimándose que este alto porcentaje se extenderá hasta que aparezcan alternativas que compitan económicamente con esta forma de energía [3]. Si bien hoy en día son más asequibles que los vehículos eléctricos, éstos tienen un impacto negativo en la salud y promueven el cambio climático.

2.1. Vehículos a combustión interna

En la actualidad se estima que el motor a combustión interna posee una eficiencia energética máxima del 30 % tomando en cuenta la energía transmitida a las ruedas con respecto a la liberada por la combustión del motor [4]. Esta ineficiente utilización de la energía produce la emisión de altas cantidades de gases de efecto invernadero, siendo el dióxido de carbono (CO_2) el principal generador de éste efecto. El aumento en la emisión de dichos gases desde el comienzo de la revolución industrial es la principal causa del incremento de la temperatura en la superficie terrestre, causando daños irreversibles en ecosistemas y la biodiversidad a lo largo del planeta. Además de los gases de efecto invernadero, el funcionamiento de vehículos a combustión trae consigo la generación de agentes contaminantes como [5]:

- **Material particulado:** Se trata del humo negro cargado de hollín, proveniente de los caños de escape. Éste puede afectar al sistema inmune de personas así como también agravar problemas respiratorios.
- **Compuestos orgánicos volátiles:** Entre los compuestos más influyentes de este grupo se encuentra el benceno, acetaldehído y butadieno. Éstos, a nivel de superficie reaccionan con los óxidos de nitrógeno en la presencia de luz solar, formando ozono y nitrato de peroxiacilo quienes son los principales componentes del smog fotoquímico, oscureciendo la atmósfera pudiendo

Capítulo 2. Vehículos en la actualidad

llegar a producir diversas enfermedades respiratorias.

- **Monóxido de carbono (CO):** Este gas tóxico emanado por la quema de combustibles fósiles es incoloro e inodoro; cuando es inhalado, afecta la capacidad de la sangre para transportar oxígeno en el organismo, siendo potencialmente peligroso para las personas.
- **Dióxido de azufre (SO_2):** El dióxido de azufre es el principal causante de la lluvia ácida ya que en la atmósfera es transformado en ácido sulfúrico. Esta lluvia es la responsable de daños importantes en las zonas forestales así como también de la acidificación de las aguas de ríos y lagos.

2.2. Vehículos híbridos

Un vehículo híbrido, es aquel que cuenta con un motor de combustión interna apoyado por un propulsor eléctrico alimentado por un sistema de baterías [3]. Ante la necesidad de encontrar nuevas formas de transporte más eficientes y sostenibles, los fabricantes de vehículos han optado por ofrecer este tipo de automóviles, que alterna ambas fuentes de energía para moverse de una forma más económica y sostenible, pero sin perder las prestaciones de un vehículo tradicional.

2.2.1. Ventajas del vehículo híbrido

La principal ventaja de esta tecnología es la utilización de los dos tipos de motores. En recorridos urbanos, donde la velocidad media es baja, el automóvil puede desplazarse haciendo uso del motor eléctrico, el cual es más eficiente. La función “*Start – Stop*” permite apagar el motor a combustión cuando el vehículo se encuentra parado o transitando a bajas velocidades, reduciendo considerablemente el consumo del carburante. A altas velocidades utiliza el motor a combustión interna dado que en estas condiciones el mismo presenta un mejor funcionamiento, haciendo uso del impulsor eléctrico solo en caso de picos de aceleración. Este sistema a su vez es capaz de recuperar parte de la energía cinética comúnmente perdida mediante el frenado regenerativo cargando las baterías del vehículo. [3]. En la figura 2.1 se puede apreciar un esquema de su funcionamiento.

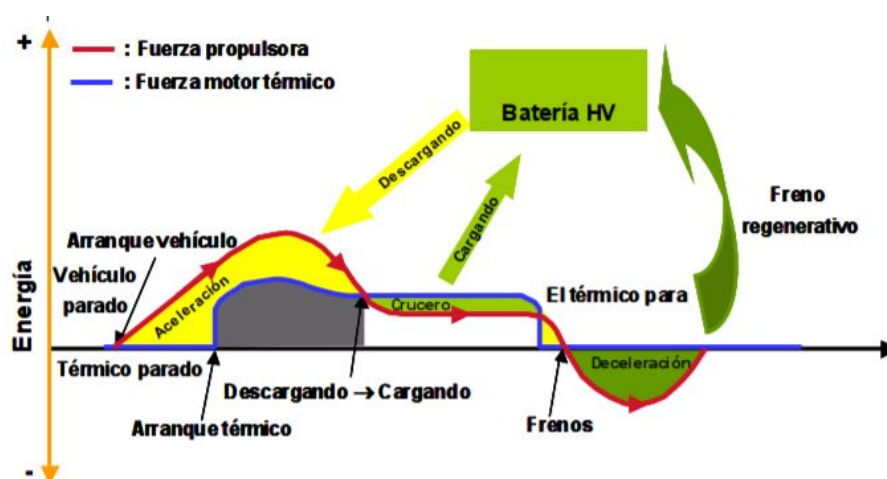


Figura 2.1: Esquema de funcionamiento de un vehículo híbrido [3]

Si bien los vehículos híbridos no tienen por qué conectarse a la red eléctrica para cargar sus baterías, a los que sí lo hacen se les llama “vehículos híbridos enchufables”. Recargando las baterías con energía proveniente de la red eléctrica se puede lograr una mejor gestión del rendimiento del automóvil, mejorando en gran medida las emisiones de gases provenientes del motor a combustión.

2.3. Vehículos eléctricos

El vehículo eléctrico elimina el motor de combustión, por lo que las ruedas son impulsadas por un motor eléctrico. La energía utilizada para ello proviene de las baterías, las cuales pueden ser abastecidas en los puntos de recarga de la red o mediante el frenado regenerativo. Hoy en día las baterías de Litio son por excelencia la mejor opción para almacenar energía en los vehículos eléctricos ya que cuentan con una alta densidad de energía y potencia, como además una baja tasa de auto descargas y lo que es aún más importante permiten llevar a cabo una gran cantidad de ciclos de carga y descarga [6].

Gracias al avance tecnológico en la construcción de las baterías, los vehículos eléctricos poseen una autonomía cada vez mayor. En los últimos 6 años la autonomía media de los vehículos eléctricos se ha extendido un 56 %, la mayoría de los modelos disponibles al día de hoy son capaces de recorrer una distancia de 200 kilómetros con una sola carga. Este hecho se representa en la figura 2.2, donde se enseña la evolución de dicha autonomía entre los años 2011 y 2017 [7].

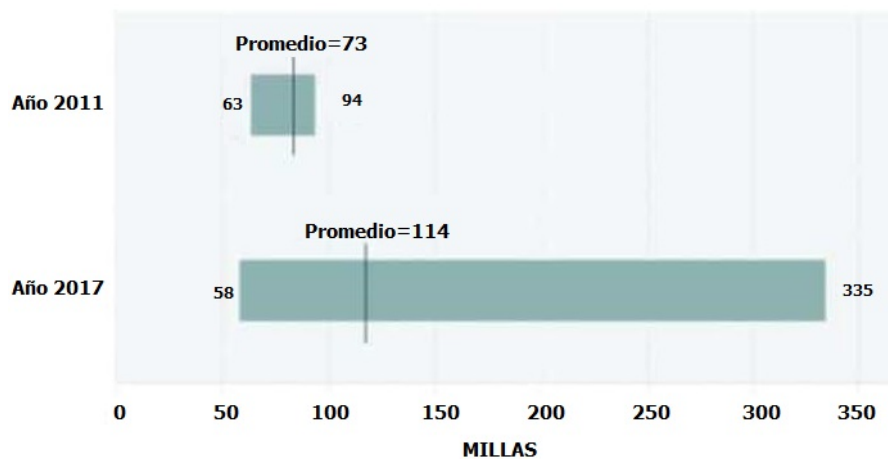


Figura 2.2: Evolución de la autonomía de los vehículos eléctricos en millas [7].

Con el crecimiento del número de vehículos eléctricos es necesario un aumento de los puntos posibles de recarga de las baterías. En la figura 2.3 se muestra la evolución anual de los mismos hasta el año 2018 en el continente europeo [7].

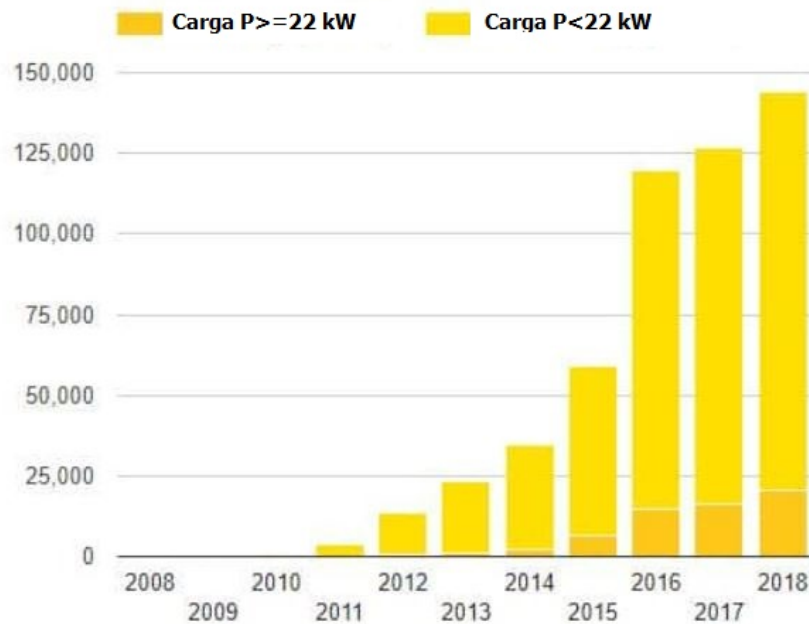


Figura 2.3: Evolución anual del número de puntos de carga accesibles en Europa [7].

Como se puede notar, existe un aumento sostenido de la cantidad de puntos de recarga de vehículos eléctricos lo que indica un aumento en la cantidad de estos vehículos a través de los años.

2.3.1. Impacto en el medio ambiente

Gracias a la electrificación del transporte se consigue un menor impacto medioambiental, pues el vehículo eléctrico desempeña un papel fundamental en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, debido a la nula contaminación durante su funcionamiento. Se estima que con la integración de una flota de 1.000 vehículos eléctricos en una ciudad, se conseguiría reducir a nivel anual una emisión de 30.000 kg de gases contaminantes como CO (Monóxido de carbono) y NOx (Óxido de nitrógeno), y en torno a 2 toneladas de CO₂ (Dióxido de carbono).

Otro de los grandes problemas que nos podemos encontrar en los medios urbanos es la contaminación acústica debida al tráfico ocasionado. Los ruidos emitidos por el vehículo eléctrico durante su funcionamiento a bajas velocidades son casi nulos, y si los hay son debidos a la rodadura del propio vehículo, lo opuesto ocurre con los vehículos a combustión interna donde el motor es la principal fuente de ruido. Con la implantación del vehículo eléctrico en las ciudades, se mejoraría la calidad de vida tanto para el conductor como para los peatones, haciendo de las ciudades un entorno agradable, y para el conductor un relajada conducción en ausencia de ruido y vibraciones.

Hasta la fecha, 17 países han puesto como objetivo la eliminación gradual de los vehículos con motor de combustión interna tomando como fecha límite el año 2050 [8].

2.4. Evolución del vehículo electrificado

Sin lugar a dudas el mercado de los vehículos electrificados está en evolución constante, teniendo una tendencia al crecimiento [9]. En la figura 2.4 se refleja la evolución de las ventas anuales de los coches eléctricos en distintos países hasta el año 2018.

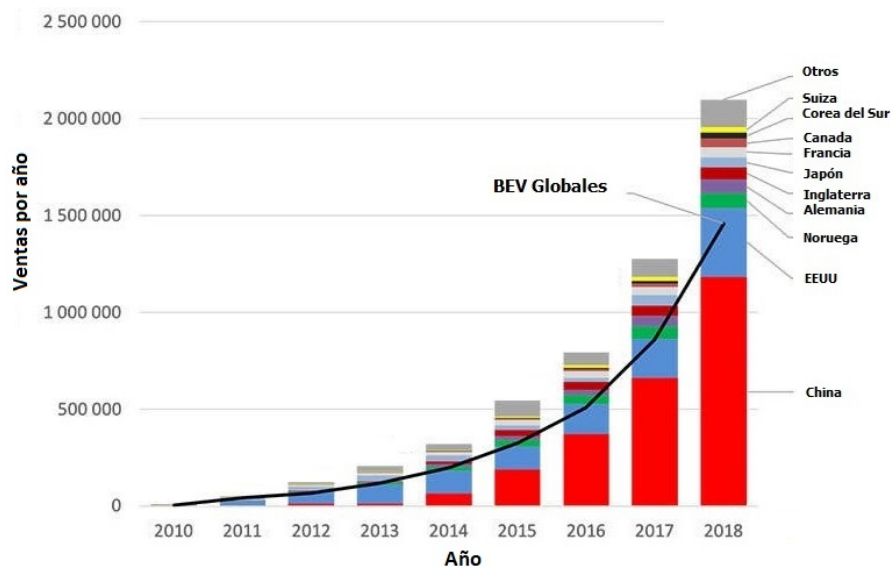


Figura 2.4: Evolución de las ventas anuales de vehículos eléctricos en el mundo [9]

Como se puede apreciar, se totalizan para el año 2018 más de 2 millones de ventas de vehículos eléctricos en el mundo, siendo China y Estados Unidos los líderes del mercado mundial. Este crecimiento del número de vehículos eléctricos sigue en ascenso, según estudio realizado por la International Energy Agency (IEA) [10], la cantidad de vehículos eléctricos en el mundo para el años 2019 asciende a 7,2 millones de unidades, donde el 47% de los mismos se encuentran China. Se estima que para 2030 habrá en todo el mundo entre 125 y 220 millones de coches eléctricos.

Capítulo 3

Conceptos del vehículo eléctrico

En este capítulo se presentarán conceptos de utilidad relacionados al vehículo eléctrico. Se comenzará por presentar la estructura básica del vehículo eléctrico, seguido por los ciclos de conducción que se utilizan para testear los mismos. Finalmente se desarrollarán conceptos generales sobre baterías dado que las mismas son la fuente de energía propulsora del vehículo eléctrico.

3.1. Estructura básica de un vehículo eléctrico

En la presente sección se enseñan los componentes básicos de un vehículo eléctrico y se da una breve descripción de cada uno. Los mismos se pueden observar en la figura 3.1:

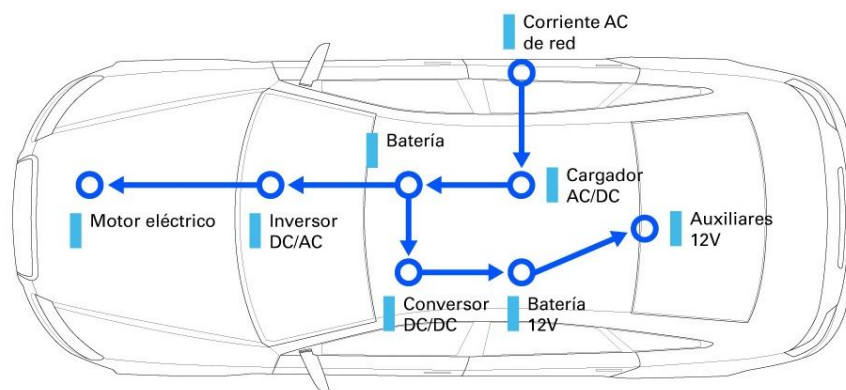


Figura 3.1: Diagrama esquemático de los componentes eléctricos del VE [11]

3.1.1. Motor eléctrico

Es el componente encargado de la propulsión del vehículo eléctrico; transforma energía eléctrica en energía mecánica. Cada vehículo eléctrico cuenta con uno,

Capítulo 3. Conceptos del vehículo eléctrico

aunque existen casos particulares de fabricantes que deciden utilizar dos, colocando uno para el eje trasero y otro para el eje delantero. El mismo es una pieza fundamental del vehículo y según el tipo de motor que se elija, la electrónica de potencia asociada al mismo cambia. Pueden ser alimentados mediante corriente alterna o corriente continua [11] [12].

3.1.2. Batería principal

Esta batería es la encargada de almacenar la energía con la cuál se alimenta el motor para propulsar el vehículo, son de gran tamaño y generalmente se alojan debajo del habitáculo del vehículo [11] [12].

3.1.3. Cargador

Es uno de los componentes más importantes del vehículo. Convierte la corriente alterna recibida por la red en corriente continua para la batería. El hecho de encontrarse a bordo del vehículo le brinda al mismo la libertad de conectarse a la red de carga en el punto que se desee [11] [12].

3.1.4. Inversor DC/AC

El inversor surge directamente para alimentar al motor del vehículo siempre que éste funcione con corriente alterna. Realiza el pasaje de corriente continua brindada por la batería principal a corriente alterna. A su vez se encarga de transformar la corriente alterna producida en el frenado regenerativo a corriente continua que pueda ser devuelta a la batería [11] [12].

3.1.5. Batería auxiliar

Esta batería se encarga de alimentar los servicios auxiliares del vehículo tales como la iluminación y los sistemas de control, entre otros. Los mismos funcionan con un voltaje de 12V [11] [12].

3.1.6. Conversor DC/DC

El conversor es utilizado para alimentar la batería auxiliar de 12V desde la batería principal del vehículo eléctrico. Debido a que ambas baterías poseen un voltaje en bornes diferente, el conversor se encarga de reducir el nivel de tensión de forma de realizar una alimentación adecuada de la misma [11] [12].

3.2. Ciclo de conducción

Un ciclo de conducción es un perfil de velocidades en función del tiempo que representa las condiciones reales de manejo de un vehículo. Existen dos tipos de ciclos de conducción: ciclos transitorios, en los cuales la velocidad y la aceleración varían constantemente, y ciclos modales, los cuales están compuestos por períodos prolongados de velocidad o aceleración constante. A su vez, dependiendo del tipo de aplicación, los ciclos se dividen en estándar y no estándar.

Los ciclos estándar como el NEDC y el WLTP son utilizados para evaluar el rendimiento de los vehículos tomando en cuenta diferentes variables, como por ejemplo el consumo de combustible, la autonomía y las emisiones contaminantes. Por otra parte, los no estándar son utilizados para llevar a cabo nuevos diseños de vehículos así como también para estudiar su longevidad [13].

A continuación se desarrollaran con mayor profundidad los ciclos NEDC y WLTP dado que hoy en día son los estándares mas utilizados globalmente.

3.2.1. NEDC - New European Driving Cycle

Creado en el año 1980 como un ciclo de conducción teórico basado en la legislación europea sobre emisiones. Dado que los vehículos eléctricos no producen emisiones, la utilización del mismo se reduce a la evaluación del consumo de estos vehículos [14]. Se divide en dos partes, la primera simula condiciones de manejo en un entorno urbano y la segunda en un entorno extra urbano. Véase figura 3.2.

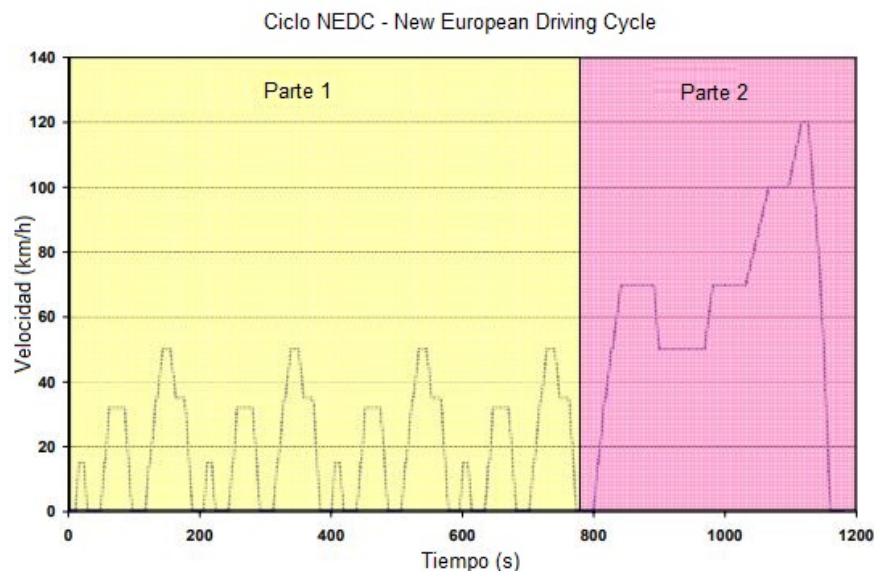


Figura 3.2: Perfil de velocidades en función del tiempo - Ciclo NEDC [14].

Capítulo 3. Conceptos del vehículo eléctrico

En la tabla 3.1 se detallan sus principales características:

Ciclo NEDC	
Distancia total (m)	11.007
Duración del ciclo (s)	1.180
Velocidad media ($\frac{km}{h}$)	33,6
Velocidad máxima ($\frac{km}{h}$)	120

Tabla 3.1: Características principales del ciclo NEDC

3.2.2. WLTP - Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

Este ciclo de conducción tiene la finalidad de convertirse en un estándar de uso global y es un firme reemplazante del ciclo NEDC. Su versión final fue desarrollada en el año 2015. El mismo se desarrolla a partir de datos recolectados de ciclos de conducción reales y busca mejorar las estimaciones de consumo de combustible y emisiones de los distintos vehículos tanto eléctricos como a combustión.

Existen tres tipos distintos de ciclo WLTP los cuales se aplican según la clase de vehículo a estudiar y son definidos por la relación potencia/peso del vehículo. Ésta relación conocida como PWr (por sus siglas en inglés “*Power weight ratio*”), se define como la potencia del motor del mismo expresada en watts (W) dividido el peso en vacío del vehículo expresado en kilogramos (kg).

Los ciclos $WLTP$ se clasifican de la siguiente manera:

- Clase 1: Vehículos con $PWr \leq 22$

- Clase 2: Vehículos con $22 < PWr \leq 34$

- Clase 3: Vehículos con $PWr > 34$

La diferencia entre cada ciclo es la cantidad de etapas que lo componen. El ciclo WLTP Clase 1 presenta una etapa con velocidades bajas y otra con velocidades medias. Véase figura 3.3 . El ciclo WLTP Clase 2 consta de tres etapas, una a bajas velocidades, otra con velocidades medias y la última con velocidades altas. Véase figura 3.4. Por último, el ciclo WLTP Clase 3 consta de 4 etapas las cuales corresponden a las velocidades baja, media, alta y muy alta [15]. Véase figura 3.5.

3.2. Ciclo de conducción

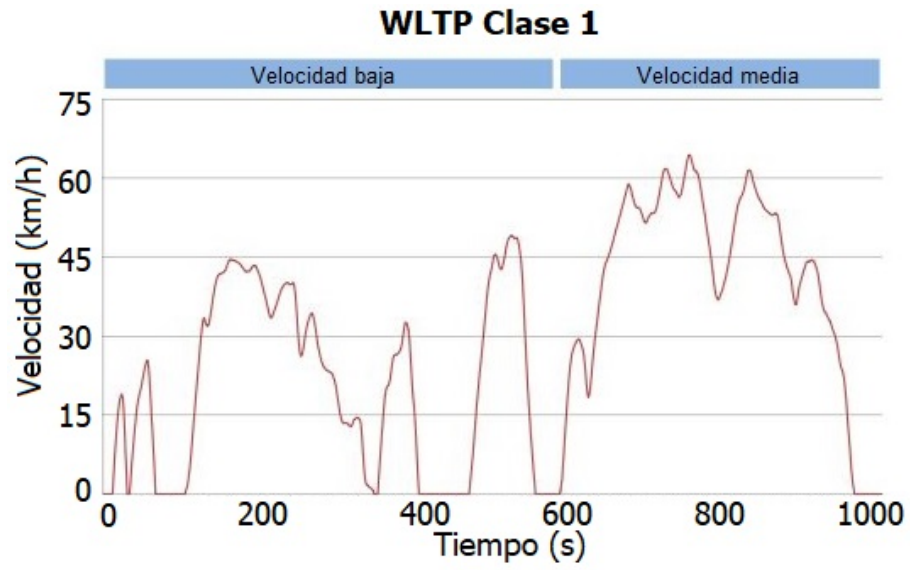


Figura 3.3: Perfil de velocidades en función del tiempo - Ciclo WLTP Clase 1 [15].

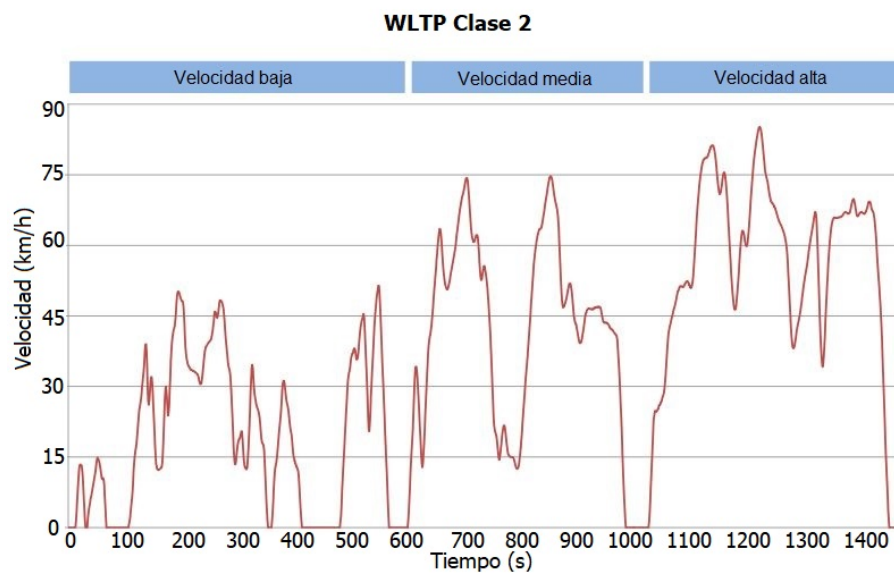


Figura 3.4: Perfil de velocidades en función del tiempo - Ciclo WLTP Clase 2 [15].

Capítulo 3. Conceptos del vehículo eléctrico

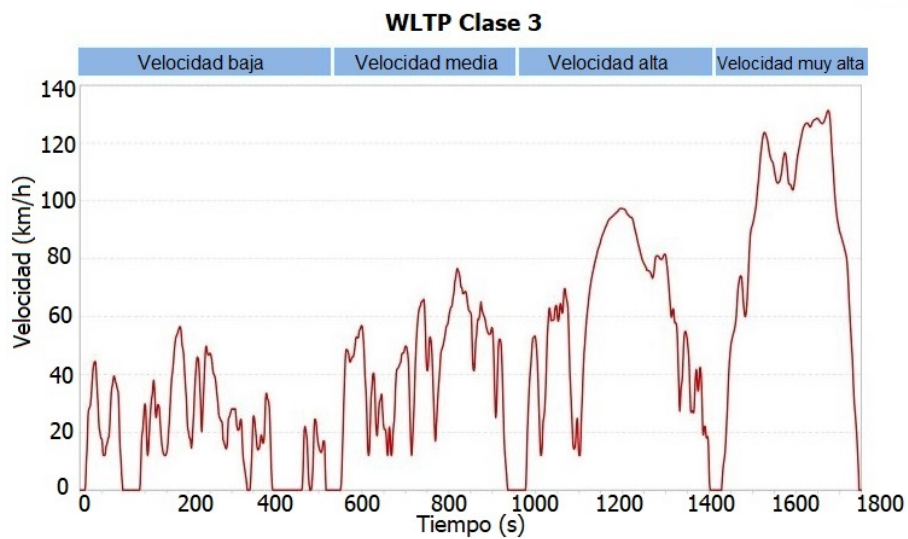


Figura 3.5: Perfil de velocidades en función del tiempo - Ciclo WLTP Clase 3 [15].

En la tabla 3.2 se detallan sus principales características.

	Distancia total (m)	Duración del ciclo (s)	Velocidad media ($\frac{km}{h}$)	Velocidad máxima ($\frac{km}{h}$)
WLTP Clase 1	8.091	1.022	28,5	64,4
WLTP Clase 2	14.664	1.477	35,7	85,2
WLTP Clase 3	23.266	1.800	46,5	131,3

Tabla 3.2: Características principales de los ciclos WLTP

3.3. Principio de funcionamiento de baterías de Ion-Litio y tipos de químicas.

3.3. Principio de funcionamiento de baterías de Ion-Litio y tipos de químicas.

La celda o batería es la unidad electroquímica básica que se utiliza como fuente de energía eléctrica cuyo principio de funcionamiento es la relación química oxidación-reducción. Una batería consiste en un electrodo positivo (cátodo), un electrodo negativo (ánodo) y un electrolito que facilita el intercambio iónico.

Cuando la batería se encuentra en un proceso de descarga, el electrodo negativo es oxidado por el electrolito liberando electrones al sistema que luego fluyen a través del circuito externo que se quiera alimentar hasta llegar al electrodo positivo de la batería. En este punto ocurre la reacción inversa (reducción) en el cátodo ganando electrones del circuito externo.

La carga eléctrica en ambos electrodos se mantiene constante mediante el flujo de iones de litio del electrodo negativo al positivo, los cuales se insertan en la estructura del electrodo. El electrolito es iónicamente conductivo pero se opone al paso de electrones para asegurar el flujo de los mismos a través del circuito externo y evitando de esta forma auto-descargas.

Una capa separadora se encarga de apartar físicamente el electrodo positivo del negativo para evitar cortocircuitos pero permitiendo el flujo de iones. Este proceso se refleja en la figura 3.6. Para cargar la batería se aplica una tensión continua respetando la polaridad en los bornes de la misma, teniendo de esta manera un proceso en sentido opuesto que en la descarga [16].

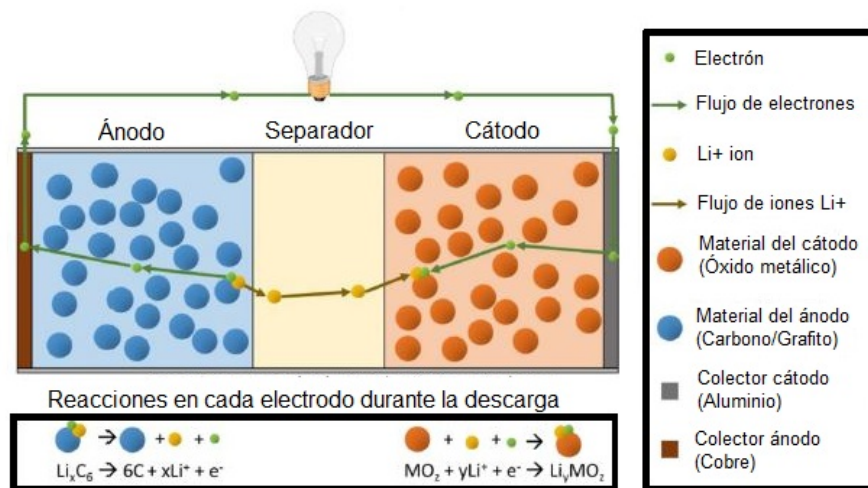


Figura 3.6: Representación del proceso de oxidación reducción en la descarga de batería de Litio [16].

La elección de los materiales que componen a las baterías tiene gran impacto en el costo y desempeño de las mismas [16]. Usualmente los colectores de corriente del ánodo y cátodo están fabricados en cobre y aluminio respectivamente, y se encuentran recubiertos por el mismo material que constituye a los mismos.

Capítulo 3. Conceptos del vehículo eléctrico

La capa separadora se encuentra constituida generalmente por polietileno o polipropileno. La composición del electrolito varía según el material de los electrodos. Generalmente se encuentra constituido por sales de litio mezcladas con solventes orgánicos.

El ánodo está compuesto generalmente por grafito. En cuanto a la composición del cátodo, existen variaciones del mismo que afectan directamente el comportamiento y desempeño de las baterías [16]. Los distintos tipos de materiales que componen el cátodo son comúnmente óxidos metálicos y la denominación de los mismos se conoce como química de la batería.

Hoy en día las químicas más utilizadas en el mercado son:

Tipo de química	Fórmula química	Descripción
<i>LCO</i>	$LiCoO_2$	Óxido de litio cobalto
<i>LMO</i>	$LiMn_2O_4$	Óxido de litio manganeso
<i>LFP</i>	$LiFePO_4$	Litio hierro fosfato
<i>NMC</i>	$LiNiMnCoO_2$	Óxido de litio níquel manganeso cobalto
<i>NCA</i>	$LiNiCoAlO_2$	Óxido de litio níquel cobalto aluminio
<i>LTO</i>	Li_2TiO_3	Óxido de litio titanio

Tabla 3.3: Tipos de química más utilizadas en el mercado [16].

En la figura 3.7 se realiza una comparación entre las celdas utilizadas para los vehículos eléctricos tomando como parámetros de interés la energía específica, potencia específica, seguridad, rendimiento, tiempo de vida y costo.



Figura 3.7: Comparación entre las distintas químicas de celda utilizadas en vehículos eléctricos según energía específica, potencia específica, seguridad, rendimiento, tiempo de vida y costo [6].

La evaluación de las baterías a través de estos parámetros aporta datos útiles

3.3. Principio de funcionamiento de baterías de Ion-Litio y tipos de químicas.

de las mismas. La energía específica nos dice cuánta energía puede almacenar la celda por unidad de masa lo que refleja la autonomía del vehículo. La potencia específica es la habilidad que tiene la celda de entregar picos de corriente solicitados por el vehículo y demuestra una potencial aceleración del mismo. Seguridad es un indicador de suma importancia para este tipo de aplicaciones dado que ante cualquier falla, el vehículo se ve afectado de gran manera. El rendimiento significa la condición de la batería al trabajar en temperaturas elevadas. Tiempo de vida refleja la longevidad. Costo es naturalmente un indicador de la accesibilidad a las mismas y un claro ejecutor al momento de elegir entre las distintas químicas [6].

Como se puede notar las baterías de óxido de litio níquel manganeso (NMC) son las que presentan mejor relación entre todos los parámetros definidos previamente. Es por ello que hoy en día es el tipo de química más utilizado en vehículos eléctricos.

3.4. Tipos de celdas

Además de los distintos tipos de química, las celdas se presentan en diferentes formatos físicos. Cada uno de ellos posee distintas características que se observan en mayor o menor proporción en los vehículos eléctricos.

3.4.1. Celdas cilíndricas

Este tipo de celdas surge con el auge de la producción en masa como una de las celdas más fáciles de manufacturar y con menor costo por Wh . A su vez ofrece una muy buena estabilidad mecánica, siendo capaz de soportar alta presión interna sin deformarse. A pesar de los distintos tipos de celdas que existen hoy en día, ésta sigue siendo la más usada mundialmente.

Las celdas cilíndricas son caracterizadas comercialmente por sus dimensiones, se utiliza el largo y diámetro para referirse a ellas. Es el caso de las 18650, las cuales presentan 18mm de diámetro y 65mm de largo. Estas son las más populares y se estima que en el año 2013 fueron producidas 2.55 billones en todo el mundo [17]. Véase figura 3.8.

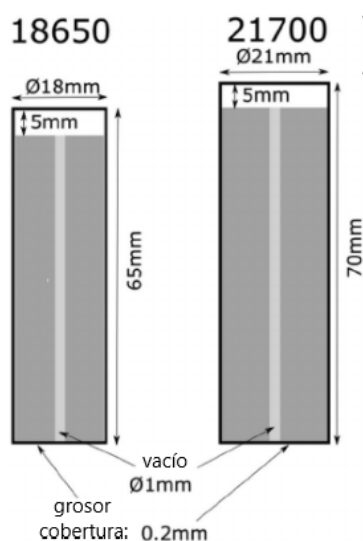


Figura 3.8: Caracterización comercial de una celda cilíndrica 18650 y 21700 a partir de sus dimensiones [17].

Típicamente son utilizadas en herramientas eléctricas, laptops, instrumentos médicos y bicicletas eléctricas. Con el desarrollo de los dispositivos móviles, como celulares y tablets, se está efectuando una migración a celdas con diseños planos por lo que en los últimos años su demanda se ha visto reducida. Este fenómeno ha sido contrarrestado por el uso de las mismas en autos eléctricos, siendo la compañía Tesla su mayor consumidor. Véase figura 3.9.

3.4. Tipos de celdas

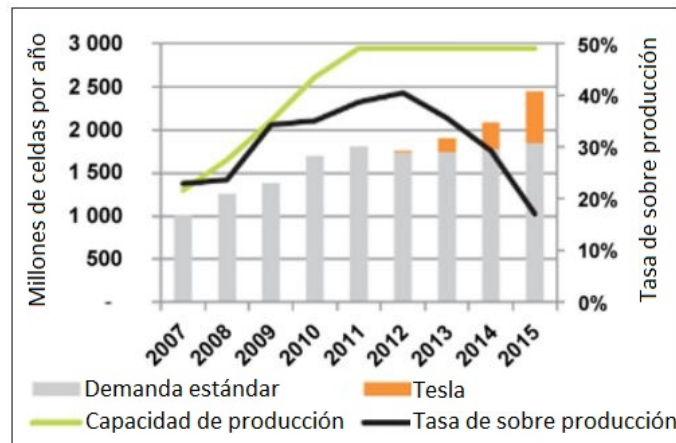


Figura 3.9: Evolución en la producción de celdas cilíndricas a través de los años [17].

3.4.2. Celdas prismáticas

Introducida al comienzo de los años 90, este tipo de celda satisface la demanda de baterías planas. Es utilizada en dispositivos móviles como celulares, tablets y pequeñas laptops. Véase figura 3.10.

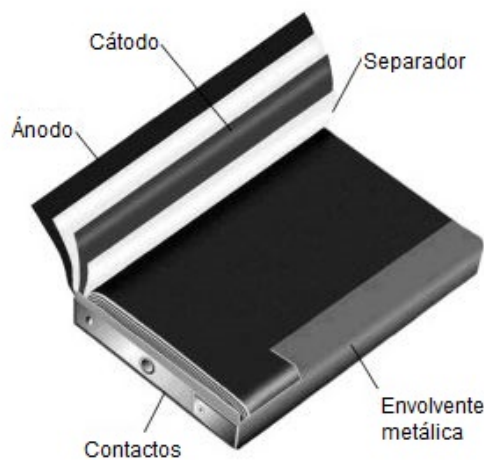


Figura 3.10: Componentes de una celda prismática [17].

No existe formato estándar para las mismas y cada fabricante realiza su propio diseño. Este tipo de celdas ofrece una mejor utilización del espacio a expensas de un costo mayor de fabricación, baja densidad de energía, y una pobre estabilidad mecánica, siendo las mismas propensas a hincharse. Es por ello que es necesaria una envolverte metálica, generalmente de aluminio [17].

3.4.3. Celdas laminadas (Pouch)

Hacen su primera aparición en el mercado en el año 1995 con un diseño radical para la época. A diferencia de las celdas prismáticas, los componentes de estas celdas se encuentran laminados y apilados. Las placas conductoras son unidas a los electrodos y salen al exterior de la celdas de forma sellada. Estos componentes son luego envasados en un film de aluminio plastificado. Véase figura 3.11.

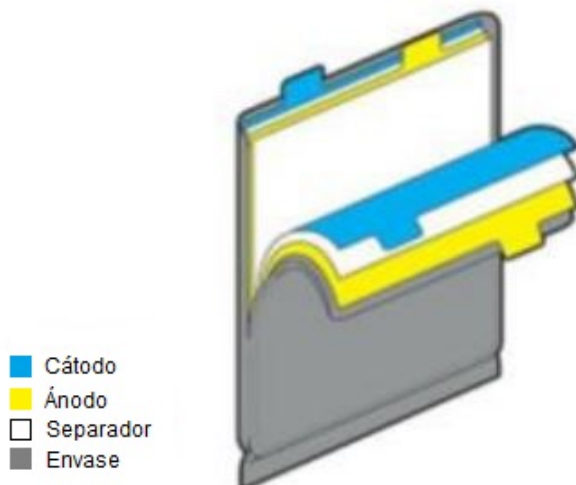


Figura 3.11: Componentes de una celda laminada (Pouch) [18]

Al igual que las celdas prismáticas, no existen estándares de fabricación por lo que las mismas son diseñadas por el fabricante según el tipo de aplicación. Eliminando la envolvente metálica rígida se reduce el peso de las mismas en comparación con las celdas prismáticas, teniendo como desventaja la disminución de su estabilidad mecánica. Este tipo de celdas presentan una alta densidad de energía específica y soportan altas temperaturas de operación, lo que ha llevado a un incremento en su utilización en vehículos eléctricos [17] [19].

3.4.4. Pack de celdas

Los altos requerimientos energéticos de un vehículo eléctrico imponen la necesidad de almacenar grandes cantidades de energía. Para ello se utiliza un “pack” de celdas, el mismo consiste en celdas individuales interconectadas de distintas formas [20]. El diseño de los “packs” depende de los requerimientos del vehículo y está dotado de cierta flexibilidad dada la cantidad de celdas existentes en el mercado. Los mismos son diseñados siguiendo la estructura celda-módulo-pack que se puede apreciar en la figura 3.12.

Para celdas que permiten almacenar una gran cantidad de energía, es posible realizar una conexión en serie entre ellas para formar un módulo, como se ve en la figura 3.12(a). El hecho de que las celdas almacenen individualmente una gran cantidad de energía reduce la cantidad a emplear para realizar el pack.

3.5. Parámetros que caracterizan el comportamiento de las baterías

En cambio, para celdas pequeñas que almacenan una menor cantidad de energía es necesario emplear una mayor cantidad de las mismas. Para crear módulos con una mayor capacidad para almacenar energía, éstas se conectan en paralelo. La conexión de los distintos módulos entre ellos formaran el pack de baterías. Véase figura 3.12(b).

Estos tipos de conexión no son estandarizados por lo que las conexiones serie/paralelo entre celdas pueden ser combinadas de distintas maneras; las conexiones en paralelo aumentan la capacidad de almacenar energía y las conexiones en serie aumentan la tensión de la celda. Como forma de caracterizar la configuración, los fabricantes indican la cantidad de celdas en serie y paralelo de la forma:

$$XsYp$$

donde Xs son la cantidad de celdas conectadas en serie e Yp celdas conectadas en paralelo.

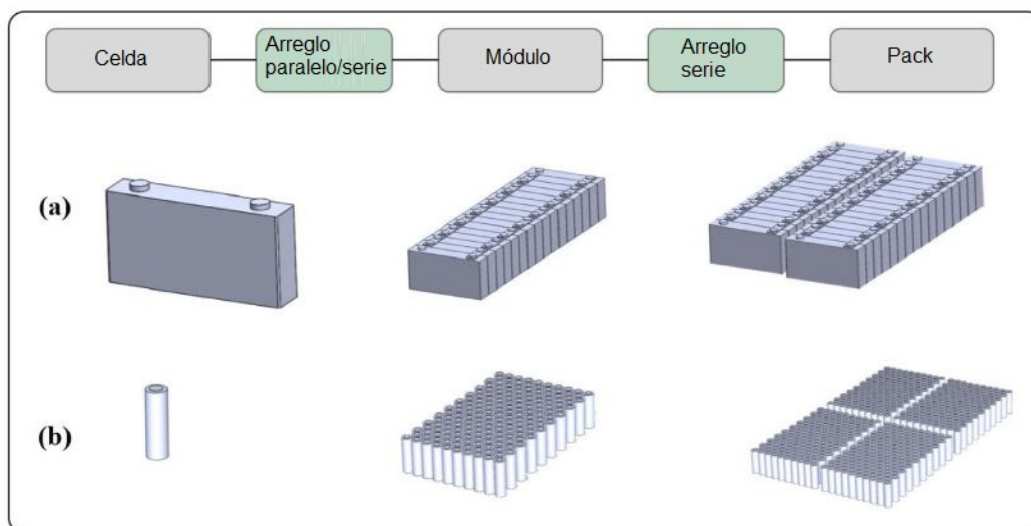


Figura 3.12: Estructura de pack de celdas con implementación en dos tipos (a) prismáticas y (b) cilíndricas [20].

3.5. Parámetros que caracterizan el comportamiento de las baterías

Una vez descrito el principio de funcionamiento de la batería, resta por conocer los distintos parámetros que caracterizan una batería de litio y que serán los que determinen su comportamiento [1] [21].

- **Tensión de celda (V):** Diferencia de potencial en bornes de la celda. Es máxima cuando la batería está en plena carga y mínima cuando está totalmente descargada. Se encuentra definida por los materiales utilizados en la construcción de la misma.

Capítulo 3. Conceptos del vehículo eléctrico

- **Tensión de la batería (V):** Diferencia de potencial en bornes del pack de celdas. Se encuentra definida por la cantidad de celdas en serie que la componen.
- **Tensión de circuito abierto - OCV (V):** Diferencia de potencial en bornes de la batería cuando la misma se encuentra sin una carga externa conectada.
- **Capacidad Nominal (Ah):** Es la cantidad de carga eléctrica que puede almacenar la batería. Para un ciclo de descarga es la cantidad de carga eléctrica que puede entregar la batería durante un tiempo determinado, por lo que sus unidades son Ah. Cuando no se especifica el tiempo de descarga se asume que el mismo es de una hora, por ejemplo para una batería de $40Ah$, esto indicaría que la batería es capaz de entregar $40A$ en 1 hora.
- **Tasa de carga/descarga - C_{rate} :** Es la velocidad con que se descarga o carga la batería respecto a su capacidad nominal. Por ejemplo una descarga a un 10 % de la corriente nominal de cierta batería se indica como $C_{rate} = 0,1C_1$. Siendo C_1 la corriente nominal (A) que se puede extraer en una hora.
- **Energía (Wh):** La energía nominal de una batería se define como el producto entre la tensión nominal de la batería por la capacidad nominal en Ah. Se expresa en Wh y da una medida de la energía que es capaz de entregar una batería en un tiempo determinado.
- **Energía específica ($\frac{Wh}{kg}$):** Expresa la energía (Wh) que es capaz de almacenar un kilogramo (kg) de la batería.
- **Densidad energética ($\frac{Wh}{L}$):** Representa la cantidad de energía que es capaz de acumular la batería por unidad de volumen.
- **Potencia específica ($\frac{W}{kg}$):** Es la potencia que la batería es capaz de entregar por unidad de masa.
- **Estado de carga - SOC (%):** Es la capacidad disponible de la batería en función de su capacidad nominal y se expresa en porcentaje.
- **Profundidad de descarga - DoD (%):** Es la capacidad extraída de una batería en función de su capacidad nominal. Es la variable complementaria al estado de carga.
- **Estado de Salud - SOH (%):** Condición o capacidad de funcionamiento actual de la batería en función de la capacidad nominal o inicial. No existe una forma de cálculo normalizada.
- **Resistencia interna (Ω):** Es la resistencia generada por la batería al paso de la corriente eléctrica. Es provocada por los materiales constructivos que la conforman.

3.5. Parámetros que caracterizan el comportamiento de las baterías

- **Autodescarga:** Pérdida de la energía almacenada debido a reacciones químicas internas de la batería. Se expresa en porcentaje con respecto a la capacidad nominal (Ah) de la batería para un tiempo de 1 mes.
- **Eficiencia carga/descarga (%):** Es la relación entre la energía útil que se puede extraer de una batería y la utilizada para realizar una carga completa (desde el 0 % al 100 % SOC).
- **Ciclo completo de batería:** Corresponde a una descarga completa de la batería partiendo de un estado de carga de 100 % de la misma y una posterior carga completa.
- **Tiempo de vida (Ciclos):** Representa la vida útil de la batería en función del número de ciclos de carga y descarga. Generalmente se expresa en número de ciclos a cierta profundidad de descarga.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 4

Estudio de la resistencia interna y modelo eléctrico de la batería

En vista de que la batería es la encargada de almacenar la energía necesaria para propulsar el vehículo eléctrico, la misma se convierte en una pieza fundamental de éste por lo que es necesario brindar al lector una caracterización de su comportamiento general. En el presente capítulo se realiza un estudio detallado de su resistencia interna para luego presentar el modelo eléctrico de la misma.

4.1. Caracterización de la resistencia interna

La resistencia interna de una batería es un concepto teórico que simplifica la comprensión del modelo eléctrico de la misma, la que engloba el impacto de diversas reacciones químicas que se producen en su interior.

Cuando no se tiene una carga conectada a la batería, ésta tiene una diferencia de potencial entre sus dos electrodos que se llama “Voltaje de circuito abierto” (*OCV*). Al conectarse una carga, la tensión en bornes pasa a tener un valor menor al de *OCV*. Dicha caída de voltaje se debe a la superposición de dos fenómenos.

Al primero se le denomina “resistencia iónica” y se encuentra determinado por la conductividad iónica del electrolito y la membrana que separa los electrodos. Una baja conductividad iónica de estos elementos produce una oposición al movimiento de los iones desde electrodo negativo al positivo, enlenteciendo de esta forma la relación oxidación-reducción que gobierna a la batería lo que produce una oposición al flujo de corriente [22] [23].

Al segundo fenómeno se le conoce como “resistencia electrónica”. Es propia de los materiales empleados y se encuentra determinado por la conductividad electrónica de los electrodos y de los colectores de corriente, a la vez se le suma el efecto de la resistencia de junta que se genera entre dos componentes distintos en contacto.

Del efecto de los dos fenómenos superpuestos se llega a la caracterización de la resistencia propiamente dicha [23] [22]. La misma supone una caída de tensión lineal y proporcional a la corriente extraída de la batería, teniendo como conse-

cuencia la generación de calor en el interior de la misma [24].

4.2. Degradación de la celda de una batería

El principal interés por obtener un modelo detallado y preciso de este parámetro reside en el hecho de que éste tiene un impacto directo y negativo en el desempeño de la batería. Asimismo se destaca que el valor de dicha resistencia tiene un cambio gradual e irreversible, aumentando con el paso del tiempo y de la cantidad de uso de la batería.

4.2.1. Efectos del aumento de la resistencia interna

Entre los principales problemas que genera una alta resistencia interna se destacan:

- Limitación de corriente en la carga/descarga.
- Caída de voltaje en bornes de la batería al conectarle una carga.
- Aumento de la temperatura en servicio.
- Menor eficiencia debido a pérdidas por el efecto joule.

En la figura 4.1 se observa una analogía de la influencia de la resistencia interna en el desempeño de la batería. Una baja resistencia interna permite a la batería cubrir la demanda de energía y alcanzar los picos de corriente solicitados por el vehículo (representación de la izquierda). Mientras tanto, una batería con alta resistencia interna no es capaz de cubrir las demandas energéticas solicitadas, viéndose limitada la corriente máxima que es capaz de entregar así como también ocasionando una caída del voltaje en bornes de la batería (representación de la derecha) [25].

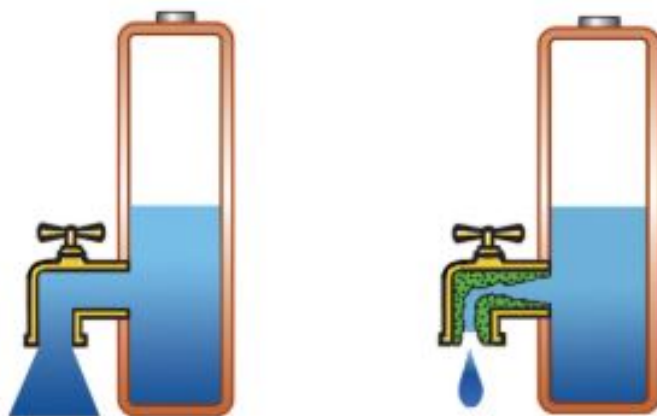


Figura 4.1: Analogía del impacto del aumento de la resistencia interna en baterías de Litio [25]

4.2. Degradación de la celda de una batería

La degradación o aumento irreversible de la resistencia interna se debe a dos factores distintos. Los mismos son edad de la batería y cantidad de ciclos completos realizados de la misma. Cada uno produce por su parte un aumento en la resistencia interna de la batería, éste efecto se produce en todas las baterías pero su impacto no es el mismo para todos los tipos de química. Aunque en la realidad los efectos de ambos aparecen combinados, los mismos son estudiados de forma individual a continuación.

4.2.2. Degradación por ciclado

Como fue mencionado anteriormente la degradación por ciclado corresponde al aumento de la resistencia de la batería provocado por la utilización de la misma, es decir, por la cantidad de ciclos completos realizados. Esta dependencia es lineal con el número de ciclos completos de batería.

La degradación de la resistencia interna acarrea un aumento en las pérdidas de energía dentro de la batería, estando éstas asociadas con la generación de calor irreversible. Por consecuencia de las pérdidas energéticas, la batería sufre una disminución de su eficiencia. En la figura 4.2 se aprecia la gráfica de la eficiencia energética en función de la cantidad de ciclos completos de batería. Dicho estudio se realizó en una celda comercial 18650 de alta densidad energética del tipo de química NCA. [26]

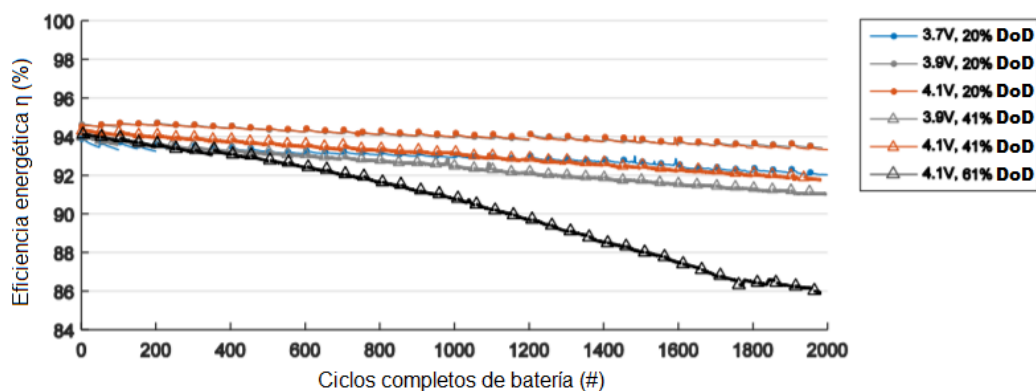


Figura 4.2: Impacto de la degradación por ciclado de la resistencia interna en la eficiencia energética para ciclos de carga/descarga a distintos DoD NCA.

Dado que para una resistencia óhmica la energía disipada en ella es proporcional su valor, un aumento lineal de la resistencia con los ciclos completos de batería produce un descenso lineal en la eficiencia energética de la batería.

4.2.3. Degradación por edad

Se entiende por degradación por edad al aumento de la resistencia interna de la batería debido a la edad de la misma. Afecta a la batería desde el momento de su fabricación y depende linealmente de su edad, ocurre estando la misma en uso como en reposo. Este efecto puede visualizarse en el estudio realizado en la figura 4.3, donde se almacenan celdas del tipo cilíndricas 18650 con química NMC por períodos prolongados de tiempo en condiciones definidas de temperatura y SOC [27].

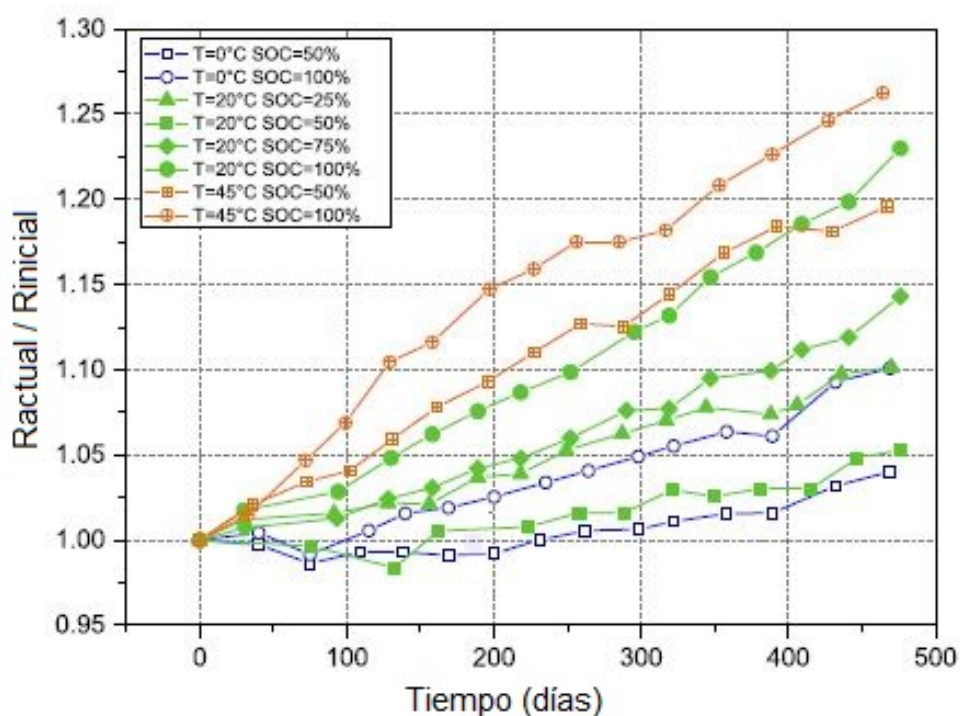


Figura 4.3: Degradación de la resistencia interna según edad para baterías cilíndricas 18650 con química NMC bajo condiciones definidas de almacenamiento [27].

Como se puede notar independientemente de las condiciones de almacenamiento, el efecto de la degradación por edad produce un aumento sostenido de la resistencia interna de la batería y su comportamiento es lineal con el tiempo de vida de la misma. Cabe destacar que el almacenamiento a altas temperaturas al igual que altos niveles de SOC provocan un mayor impacto en la degradación.

4.3. Influencia de la temperatura en la resistencia interna

4.3. Influencia de la temperatura en la resistencia interna

Si bien exponer a la batería a temperaturas elevadas genera una degradación acelerada de la misma, esto también provoca una mejora de su rendimiento. Para este caso la resistencia interna tiene una reducción de su valor nominal a costa de la disminución de la vida útil de la batería. Para el caso contrario un descenso de la temperatura genera una gran suba del valor de la resistencia, como se puede observar en la figura 4.4 [28].

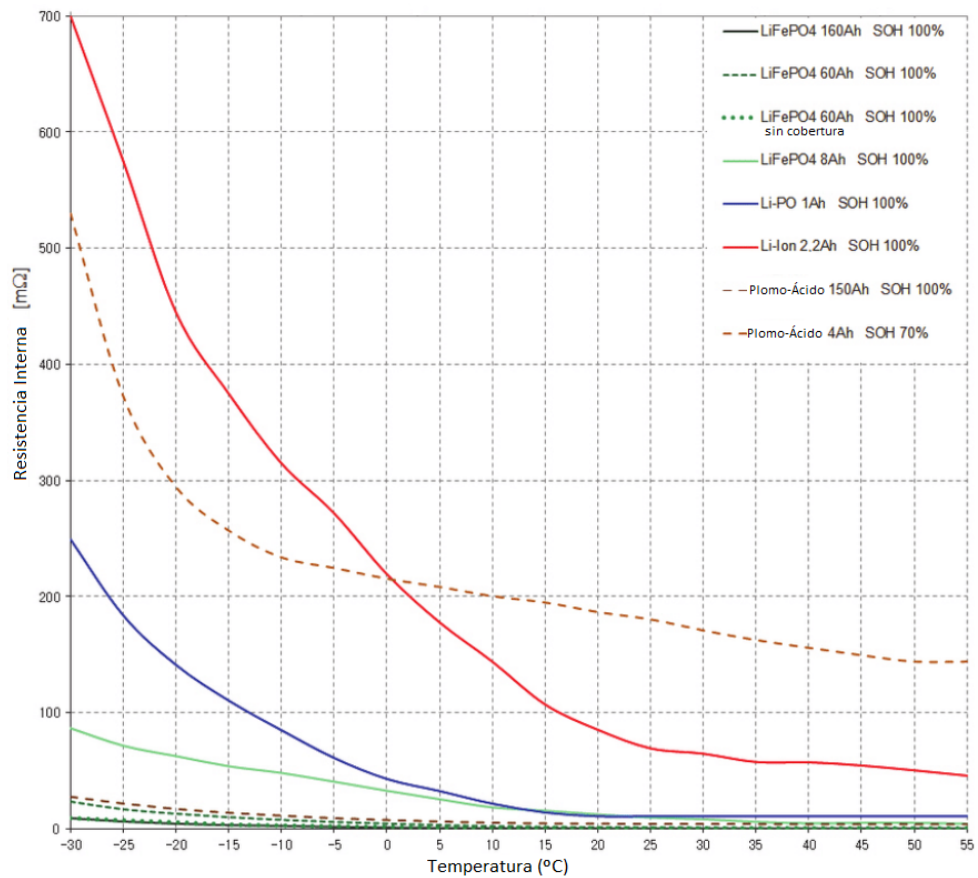


Figura 4.4: Dependencia de la resistencia interna según temperatura para baterías a base de litio (LiFePO4, Li-PO, Li-Ion) y plomo-ácido [28].

4.4. Influencia del estado de carga en la resistencia interna

Al igual que ocurre con la temperatura, el nivel de SOC de la batería influye directamente sobre la resistencia interna haciéndola variar a lo largo de un ciclo de batería completo. En la figura 4.5 se pueden apreciar los resultados experimentales de la relación entre resistencia interna y SOC en cuatro baterías nuevas del tipo 18650 de química NMC, a 25 °C [29].

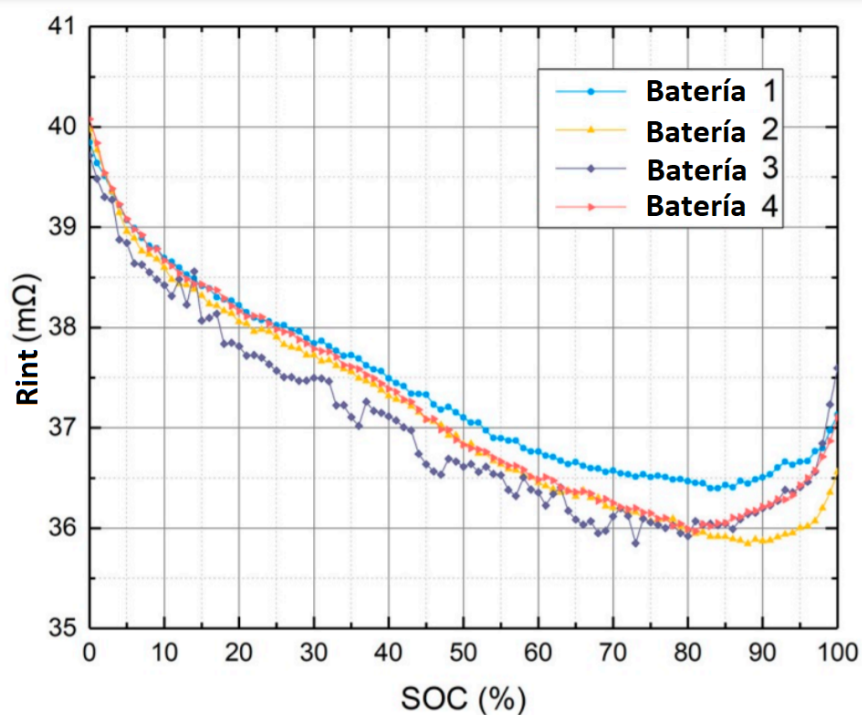


Figura 4.5: Influencia del estado de carga de la batería (SOC) en el valor de la resistencia interna [29].

Se puede observar que el máximo valor se da con la batería totalmente descargada. Sin embargo el menor valor de la resistencia no se manifiesta con la celda completamente cargada, sino que se presenta en un rango de entre el 80% y 90% del SOC. También se puede observar que existe una diferencia en dichos valores entre las distintas celdas a pesar de que se trata del mismo modelo y son testeadas en iguales condiciones.

4.5. Modelo de resistencia interna de la batería

El modelo eléctrico de la celda consiste en una fuente de tensión, la cuál varía su valor según el *SOC* y en una resistencia interna que modela la caída de tensión dentro de la celda. Este modelo permite describir cómo se relacionan eléctricamente el *SOC*, corriente y temperatura de la celda con el voltaje en bornes de la misma. Comparado con modelos matemáticos de celdas, este tipo de abordaje es más simple y permite entender las características eléctricas de la celda [30].

El modelo de resistencia interna se puede observar en la figura 4.6. Éste implementa una fuente de tensión conocida como voltaje de circuito abierto (OCV - Open Circuit Voltage) con una resistencia óhmica que simula la oposición al paso de corriente dentro de la celda.

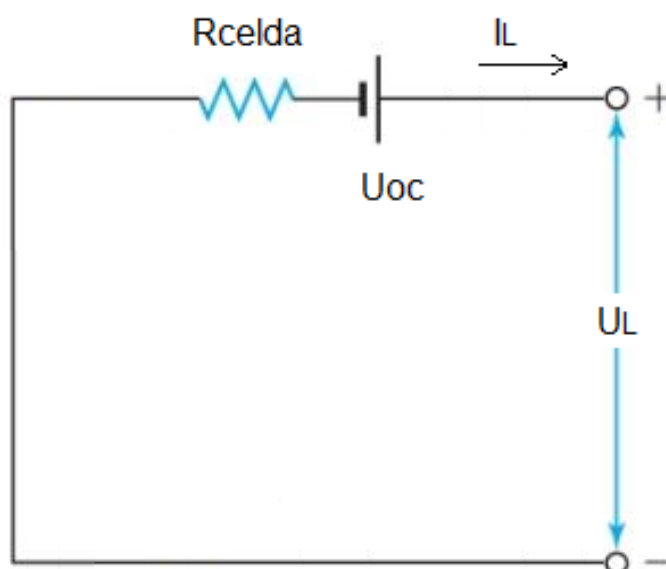


Figura 4.6: Modelo de resistencia interna para celdas a base de litio.

Para este modelo, U_L corresponde al voltaje en bornes de la celda e I_L a la corriente de descarga de la misma definida como positiva saliente de ella. La resistencia óhmica R_{celda} representa la oposición al paso de corriente dentro de la celda y genera una caída de tensión dentro de la misma. Estos parámetros se relacionan entre ellos según la ecuación 4.1.

$$U_L = U_{OC} - I_L R_{celda} \quad (4.1)$$

Capítulo 4. Estudio de la resistencia interna y modelo eléctrico de la batería

La simplicidad del modelo eléctrico permite caracterizar el comportamiento del pack de celdas que se encuentra en los vehículos eléctricos. La tensión en bornes del pack es la suma de las tensiones de todas las celdas en serie que lo compongan. La resistencia interna total es la suma de todas las resistencias internas de las celdas en serie que conforman a la misma. En caso de tener celdas en paralelo, la resistencia interna equivalente es menor que la individual de cada una. Véase figura 4.7.

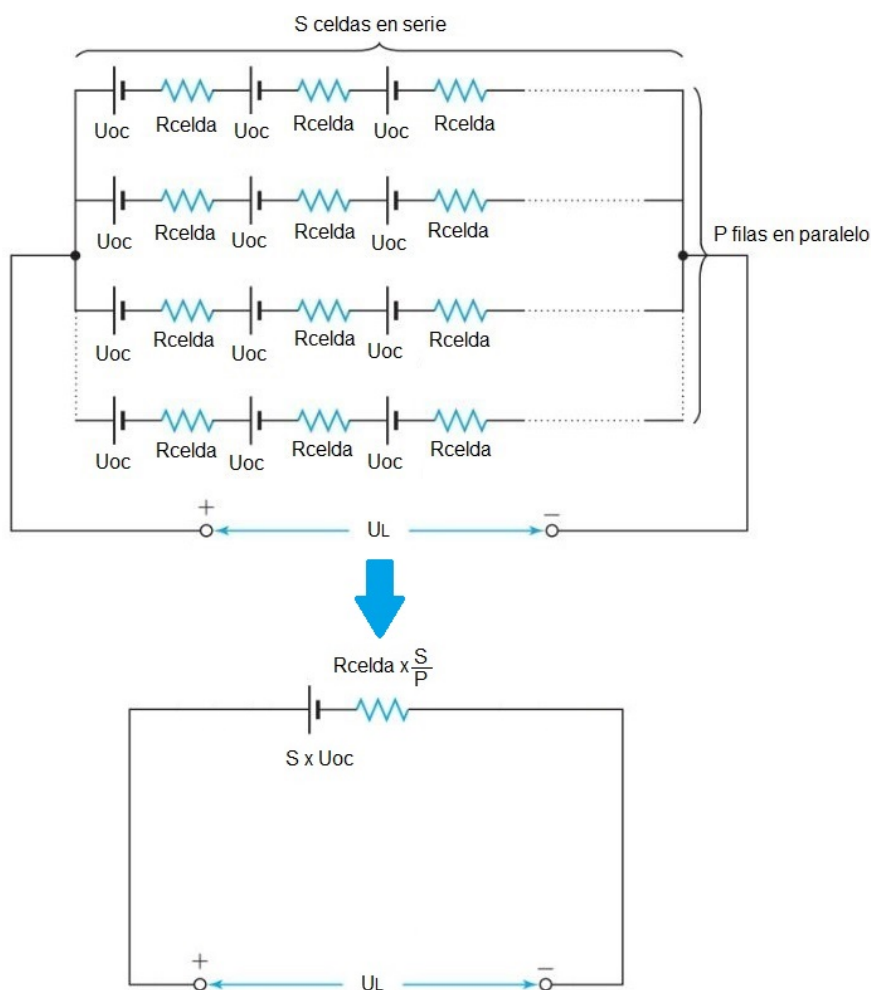


Figura 4.7: Modelo eléctrico equivalente de pack de baterías.

Capítulo 5

Influencia de los tipos de carga en la batería

La batería es uno de los puntos débiles de los vehículos eléctricos, motivo por el cual se estudian permanentemente los factores que inciden en la degradación de las mismas. Uno de los factores causantes de este deterioro es el tipo de carga que se les realiza, el cual produce una reducción en la capacidad de la batería. El tipo de carga se compone por la estrategia de recarga así como también la potencia de la misma [31] [32]. Por esta razón se dedica el presente capítulo al estudio en profundidad de los tipos de carga de las baterías y su efecto en las mismas.

5.1. Estrategia de recarga de la batería

Con el objetivo de analizar la influencia de los diferentes tipos de carga sobre la capacidad de la batería, se considera como punto de partida la estrategia de carga que se realiza a las mismas en los vehículos eléctricos. El método más utilizado comercialmente hoy en día se conoce como protocolo CC-CV, el mismo se divide en tres etapas principales, etapa inicial o de precarga, carga CC y carga CV [33]. Véase figura 5.1.

En la etapa inicial se realiza un aumento progresivo de la corriente de carga hasta que la misma arriba a su valor nominal, a partir de ese momento se da comienzo a la etapa de carga a corriente constante. Éste aumento de la corriente de carga inicia con un valor correspondiente al 10% de la corriente nominal de la batería y presenta un crecimiento escalonado hasta arribar a la corriente nominal de la misma, de esta manera se controla el aumento de la potencia que ingresa a la batería para evitar daños en ella. Una vez que se ingresa en la etapa de carga CC, la corriente que ingresa a la batería se mantiene constante con un valor igual a su corriente nominal cargando la misma hasta que el estado de carga de la batería (SOC) arriba a un valor del 80% y el voltaje en bornes de la batería a su valor nominal, esta situación marca el fin de la carga CC y da comienzo a la carga CV. En esta etapa con el fin de evitar sobrecargas y aliviar el estrés sufrido por la batería en la etapa de carga CC, se produce una disminución de la corriente de

Capítulo 5. Influencia de los tipos de carga en la batería

carga manteniendo constante el valor de voltaje hasta arribar a un estado de carga (SOC) del 100 %, la corriente de carga en esta situación se ve reducida hasta un 7 % de la corriente nominal de la batería [33].

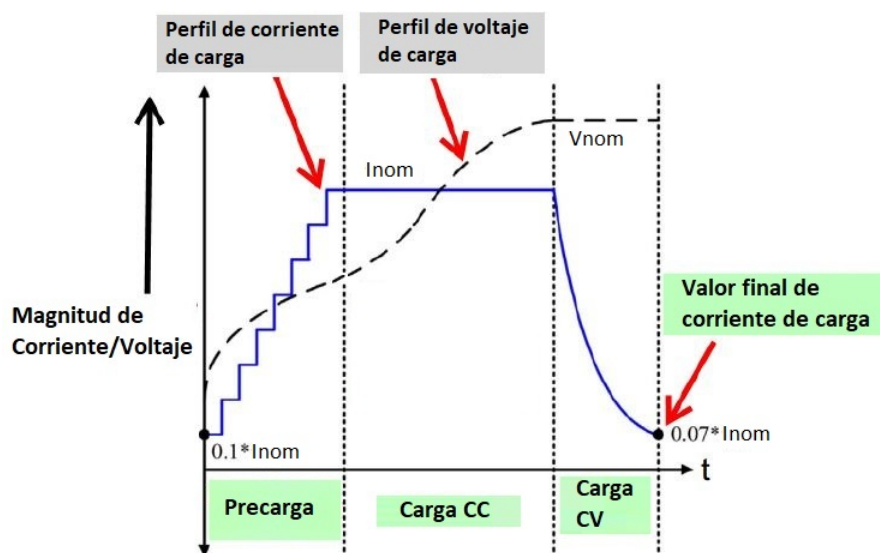


Figura 5.1: Estrategia CC-CV de recarga de baterías de vehículos eléctricos [33]

A modo de resumen el protocolo CC-CV permite efectuar un tipo de carga controlado de la batería, es decir, a partir de los controles de corriente y voltaje se controla la potencia que ingresa a la misma de modo de no producir daños en ella y reducir el estrés a la cual se ve sometida.

5.2. Potencia de carga de las baterías

En la actualidad existe una gran variedad de formas de realizar la carga de las baterías. Comenzando por la carga a través de un tomacorriente convencional (Schuko), la misma es la menos recomendada dado que el hogar no cuenta con un sistema de protección adecuado para vehículos eléctricos, a su vez este tipo de carga requiere un tiempo de recarga elevado y sólo se encuentra disponible en algunos vehículos de pequeño porte. Por otro lado lo habitual y recomendado es el uso de un sistema de alimentación específico para vehículos eléctricos (SAVE).

El SAVE se ubica entre la red eléctrica y el vehículo y cumple la función de gestionar la carga estableciendo la comunicación entre el vehículo y la red, proporcionando protecciones eléctricas adecuadas con especial énfasis en la seguridad del usuario. Los mismos se presentan con variadas especificaciones de potencia [34].

En la tabla 5.1 se detallan los distintos modos en que se puede realizar la carga de un vehículo eléctrico discriminando los mismos por potencia [34].

5.2. Potencia de carga de las baterías

Corriente	Tipo de carga	Potencia	Modo
Alterna	Lenta	2.2 kW	Schuko
	Estándar	Menor o igual a 7.4 kW	SAVE
	Semi Rápida	Mayor a 7.4 kW y menor o igual a 22 kW	SAVE
	Rápida	Mayor a 22 kW y menor o igual a 43 kW	SAVE
Continua	Super Rápida	Mayor a 43 kW	SAVE

Tabla 5.1: Discriminación de los distintos modos de carga que se pueden aplicar en un vehículo según potencia [34].

A continuación se caracterizan los modos de carga:

- **Carga Lenta:** Se denomina como carga lenta cuando se conecta el vehículo a la red de suministro de corriente alterna en un toma estándar de la red (230V AC). La utilización de este tipo de dispositivos se centra en un uso doméstico debido a su baja potencia (2.2 kW , 16A). El tiempo estimado de carga con este método en un vehículo eléctrico promedio es mayor a 11 horas.
- **Carga Estándar:** Para este tipo de carga es necesario contar con el SAVE, la misma se realiza en corriente alterna y la potencia brindada es de un máximo de 7.4 kW en un nivel de tensión de 230V, entregando una corriente máxima de 32A. Este tipo de carga puede llegar a variar aproximadamente entre unas 2 a 6 horas.
- **Carga Semi Rápida:** En este caso la potencia máxima de carga que es capaz de suministrar el SAVE es de 22 kW. El tiempo de carga varía entre 2 y 3 horas, es por este motivo que dicho tipo de carga es de los más usados en la actualidad.
- **Carga Rápida:** Para este tipo de carga la potencia máxima que es capaz de suministrar el SAVE es de 43 kW, en donde los tiempos de carga pueden llegar a ser menores a una hora en caso que el vehículo lo permita.
- **Carga Super Rápida:** Para este caso la carga se realiza mediante un SAVE, pero con la particularidad que es en corriente continua. Para ello se dispone de un convertidor de corriente alterna a continua. La potencia brindada es mayor a los 43 kW, en donde los tiempos de carga son menores a una hora. El elevado coste de estos equipos y la infraestructura necesaria es el principal inconveniente con el que se cuenta [35].

Cabe destacar que la potencia con la que se cargará un vehículo será siempre la menor entre la potencia disponible en el SAVE y la que admite el cargador del vehículo, es decir que si un usuario desea cargar su vehículo en un centro de carga que puede suministrar 43 kW, pero el cargador del vehículo tolera una potencia de carga máxima de 7 kW, el vehículo se cargará a la potencia máxima del cargador del vehículo. Este dato es brindado por el fabricante y el mismo está disponible tanto para cargas en corriente alterna, como para cargas en corriente continua.

5.3. Degradación de las baterías al variar el tipo de carga

Una vez presentados los distintos tipos de carga que se pueden realizar a una batería (estrategia de carga y modo en que se carga la batería), es de interés observar las consecuencias sobre la misma que tiene la variación de los modos en que se carga la batería. En el estudio realizado en [31], se observa el efecto de variar los mismos en baterías de 55Ah con tipo de química NMC a una temperatura de 28°C, observándose un comportamiento lineal en la caracterización del SOH en función del ciclado. Véase figura 5.2.

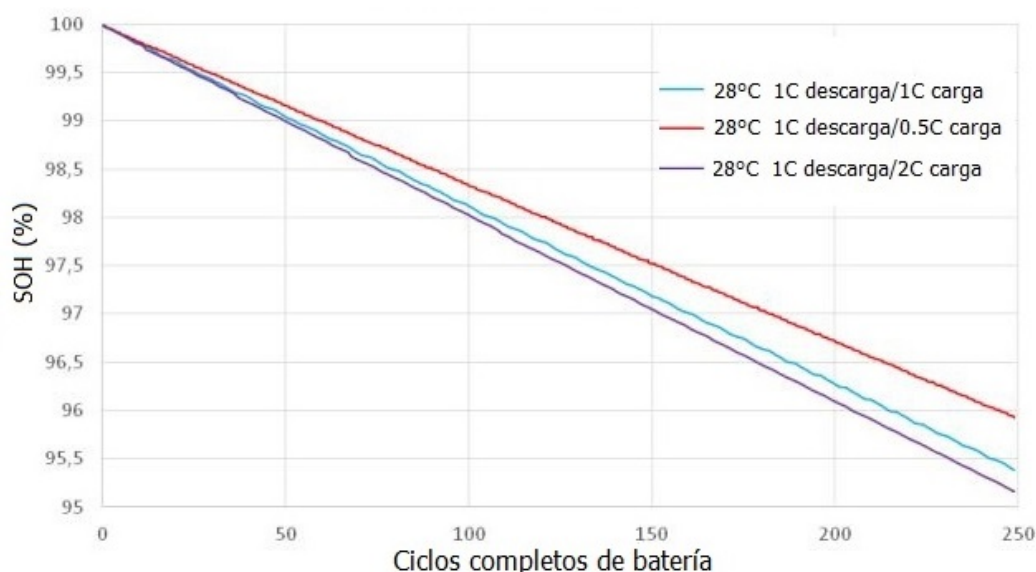


Figura 5.2: Pérdidas de capacidad según variación en la velocidad de carga [31].

Si se realiza una carga a mayor potencia, es decir a mayor velocidad de carga (2C), el SOH de la batería es menor que en el caso que la carga es de 1C. Análogamente si se comparan los efectos en la batería con tasa de carga 1C y 0.5C, se observa que para el mayor C_{rate} se obtienen mayores pérdidas en el estado de salud de la batería. Por lo tanto una variación en la tasa de carga de la batería (C_{rate}) bajo las mismas condiciones, afecta la pérdida de capacidad de la batería de distintas maneras, a mayor potencia de carga mayor es la pérdida de capacidad que se produce en la batería.

Capítulo 6

Estado de Salud de la batería - SOH

El creciente desarrollo del mercado de los vehículos eléctricos pone de manifiesto la necesidad de conocer la vida útil de los mismos de forma de poder insertarse en el mercado actual y ser competitivos con los ya establecidos autos a combustión interna. El éxito de este tipo de vehículos está ligado a la fuente de energía que los alimenta, debiendo ofrecer una operación confiable y segura a distintas temperaturas y en diferentes condiciones a lo largo de toda su vida útil, la misma además debe ser comparable con la de un auto a combustión [36].

Hoy día las baterías de litio son las más elegidas para este tipo de aplicación dada su alta densidad de energía y potencia, y su baja tasa de auto descarga [36] [37]. A pesar de eso, una de las grandes limitantes que presenta este tipo de tecnología es la degradación que sufren las baterías. Los efectos producidos por la degradación limitan el desempeño de las baterías y es un fenómeno que ocurre durante todo el transcurso de su vida útil estando las mismas en uso o no. Además este fenómeno ocurre presentando mayor o menor impacto en proporción al tipo de uso que brinde la batería así como también las condiciones externas en las cuales se encuentra. Distintas organizaciones coinciden en estimar que el mercado de los VE representará un 60 % del total del mercado de automóviles de pasajeros para el año 2050 por lo que es de vital importancia conocer el comportamiento y condición de las baterías en todo momento con el fin de obtener su máximo rendimiento [36].

6.1. Definición de SOH

El origen de los mecanismos de degradación dependen de factores químicos y constructivos de la batería y se ven altamente influenciados por las condiciones externas y los patrones de uso a las que se sometan las mismas. A su vez la degradación puede ser disociada en dos grandes áreas, degradación por edad y degradación por ciclado, ambas producen una pérdida de la capacidad para almacenar energía [36]. Para ejemplificar dicho efecto, véase la figura 6.1.

Capítulo 6. Estado de Salud de la batería - SOH



Figura 6.1: Efecto de pérdida de capacidad en baterías.

El tiempo y la cantidad de uso de las baterías promueven el “crecimiento de la zona rocosa” la cual no permite el almacenamiento de energía, dejando cada vez menos espacio de almacenamiento y reduciendo el desempeño de las baterías. Es de vital importancia cuantificar estos efectos para poder dar un tiempo de vida estimado para las baterías.

El indicador principal de la degradación de la batería es el SOH (por sus siglas en inglés “State of Health”). Este indica la capacidad para almacenar energía que presenta la batería en determinado momento con respecto a su condición inicial. Escrito de forma matemática:

$$SOH = \frac{C_{actual}}{C_{inicial}} * 100 \quad (6.1)$$

Para la aplicación en vehículos eléctricos muchos fabricantes consideran que la batería llega al fin de su vida útil cuando $SOH = 80\%$, es decir cuando la batería presenta una capacidad para almacenar energía correspondiente al 80% de su capacidad inicial, no obstante existen excepciones donde los fabricantes consideran valores de $SOH = 75\%$ ó $SOH = 70\%$ como límite de la garantía de la batería.

La capacidad de una batería no puede medirse directamente, por lo que debe ser estimada en función de magnitudes medibles como voltaje, corriente y temperatura las cuales se relacionan entre ellas de distintas formas [37]. De esta manera se convierte en imperativo conocer y modelar los fenómenos que degradan las baterías para así poder desarrollar tiempos de vida estimado para las mismas.

6.2. Degradación por edad

La degradación por edad propiamente dicha es la porción de capacidad que pierde la batería durante el almacenamiento [36], dado que los vehículos se encuentran estacionados un 90% del tiempo, este fenómeno se convierte en determinante en la pérdida de capacidad de la batería [38].

6.3. Degradación por ciclado

Existen dos factores principales que afectan el comportamiento de las baterías durante su almacenamiento, los mismos son temperatura y SOC. El almacenamiento de las mismas a altas temperaturas o altos niveles de SOC aumenta la velocidad con la que pierden capacidad [38] [39] [26]. Dicho efecto ocurre en mayor o menor proporción dependiendo del tipo de química de la batería. Este efecto se ejemplifica en el estudio realizado en [26] para celdas cilíndricas del tipo 18650 con química NCA, donde se almacenan las mismas en distintas condiciones. Véase figura 6.2.

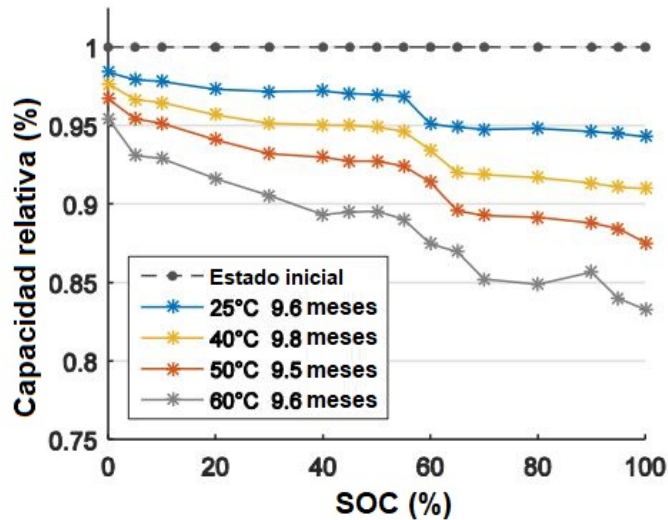


Figura 6.2: Efecto del SOC y la temperatura en la pérdida de capacidad para el almacenamiento de baterías de distintas químicas. [26]

Como se puede observar, altos niveles de SOC durante el almacenamiento al igual que altas temperatura conllevan a un incremento en la velocidad con la que las baterías pierden capacidad.

6.3. Degradación por ciclado

Este fenómeno ocurre durante la carga como la descarga de la batería. Es una consecuencia directa de la cantidad de ciclos completos de la misma, la temperatura ambiente y los niveles de corriente a través de ella [36] [40]. Se entiende como la porción de capacidad que pierde la batería debido a la utilización de la misma.

Al igual que en la degradación por edad la temperatura de trabajo juega un rol importante en la degradación de la batería durante el ciclado. Altas temperaturas aumentan directamente la velocidad de pérdida de capacidad de la batería, reduciendo de esta manera su vida útil. Dicho efecto es observado en [40] en el cual se estudian celdas comerciales con química NMC de 40Ah a las cuales se le realizan ciclos completos con una tasa carga/descarga de 1C a distintas temperaturas hasta llegar un $SOH = 80\%$. Véase la figura 6.3.

Capítulo 6. Estado de Salud de la batería - SOH

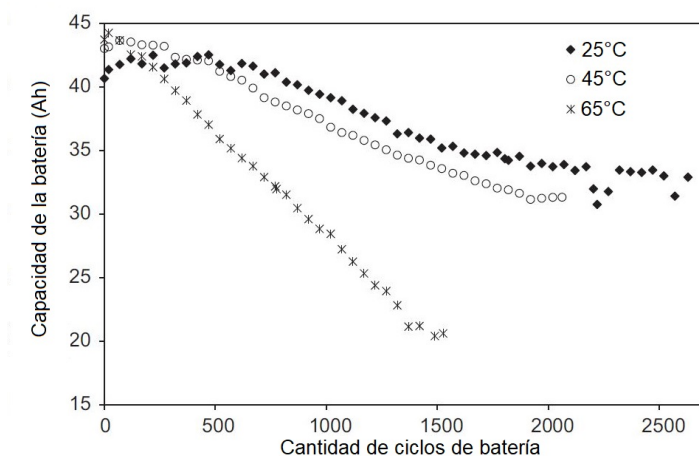


Figura 6.3: Efecto de la temperatura en la pérdida de capacidad para baterías con química NMC durante el ciclado.

Claramente se puede notar el comportamiento descrito anteriormente, el aumento de la temperatura de ciclado produce un aumento de la velocidad de pérdida de capacidad lo que lleva a una disminución de la vida útil de la batería, es decir, a mayor temperatura disminuye la cantidad de ciclos completos que la batería es capaz de realizar hasta llegar a un $SOH = 80\%$.

Sumado al efecto anterior las altas profundidades de descarga (DoD) generan una pérdida acelerada de la capacidad para almacenar energía [41] [36]. El estudio [41] enseña este fenómeno para celdas con química NMC de $20Ah$ a temperatura constante para un valor límite de $SOH = 80\%$. Véase figura 6.4.

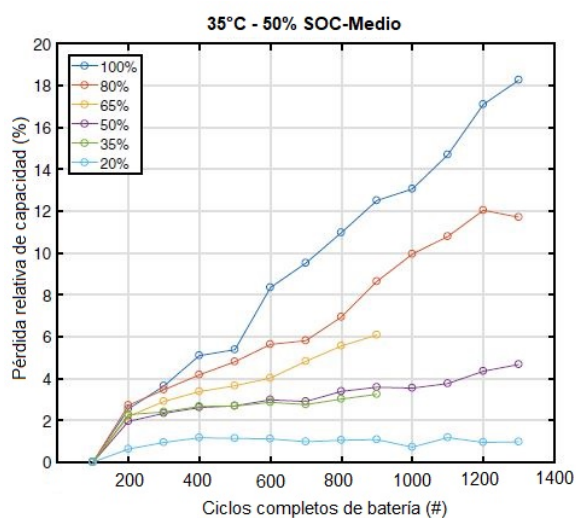


Figura 6.4: Efecto del DoD en la pérdida de capacidad para baterías NMC durante el ciclado.

6.3. Degradación por ciclado

La pérdida relativa de capacidad se expresa matemáticamente como

$$PRC = \frac{C_{inicial} - C_{actual}}{C_{inicial}} \quad (6.2)$$

y como se observa en la figura, su efecto se ve altamente amplificado para valores de DoD mayores a 65% para una temperatura constante. Dado que el fin de la vida útil de la batería para este estudio se considera cuando el $SOH = 80\%$, altos niveles de DoD generan en la batería una pérdida de capacidad de forma acelerada lo que provoca que la misma sea capaz de realizar una menor cantidad de ciclos completos de batería reduciendo de esta manera su vida útil.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 7

Frenado Regenerativo

El frenado regenerativo presenta una gran influencia en el comportamiento del vehículo eléctrico dado que el mismo recupera parte de la energía anteriormente utilizada para impulsar al mismo, aumentando de esta manera la eficiencia energética de éste. Debido a la importancia de este sistema se dedica el presente capítulo al estudio del comportamiento e influencia del frenado regenerativo en el VE.

7.1. Diferencia entre frenado mecánico y regenerativo

Como punto de partida, es importante realizar una comparación entre el funcionamiento del frenado regenerativo y el frenado mecánico. La diferencia entre ambos radica en los siguientes puntos:

- En los vehículos a combustión, al pisar el pedal del freno se crea fricción entre el disco y la pastilla de freno, evitando que las ruedas giren. En este proceso, la fricción transforma la energía cinética en calor para luego disiparla al ambiente.
- En los vehículos eléctricos, el frenado regenerativo actúa cuando se suelta el pedal del acelerador o se pisa el pedal de freno. Para este caso, el motor funciona como generador imponiendo un par que se opone al movimiento del vehículo en el eje y con la energía generada se carga la batería. A su vez, este sistema se encuentra acompañado de un sistema de frenos mecánicos, los cuales se activan ante la necesidad de una frenada más poderosa [42] [43].

7.2. Funcionamiento del frenado regenerativo

En un coche eléctrico, el frenado se desarrolla en dos etapas. En la primera, para frenados suaves, interviene el frenado regenerativo siendo el motor el encargado de frenar el tren delantero, mientras que para el tren trasero se utiliza el freno mecánico convencional. Para la segunda etapa, ante requerimientos de frenado más agresivos, se utiliza en el tren trasero como en el delantero el freno mecánico convencional dado que en estas situaciones el frenado regenerativo llega a su límite. Véase figura 7.1 [44] .

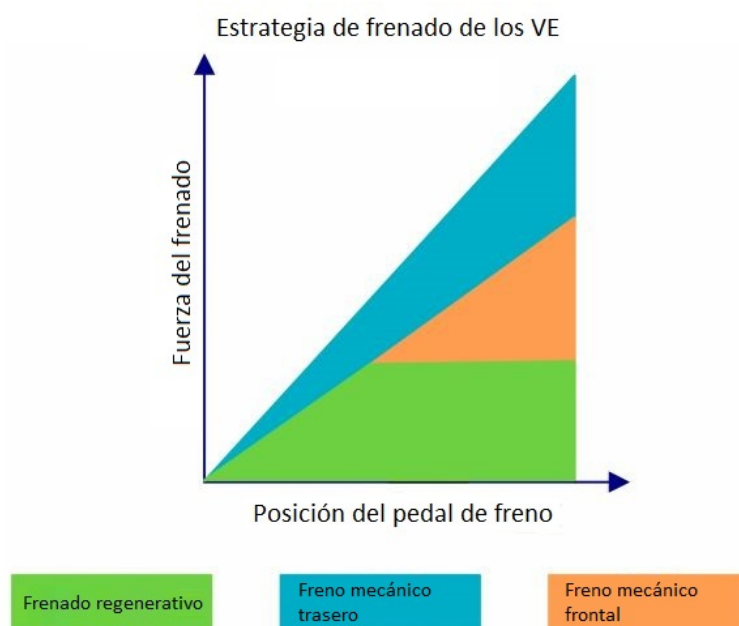


Figura 7.1: Contribución al frenado según nivel de accionamiento del pedal de freno [44].

El elemento central del sistema de frenado regenerativo, es el controlador también conocido como KERS (Kinetic Energy Recovery System), éste es el elemento de mayor importancia pues controla el pasaje a modo generador del motor. Además se encarga de monitorear la velocidad de las ruedas, calcular el par resistente y controlar la corriente generada para alimentar las baterías.

El comando de par puede ser positivo o negativo. Cuando el mismo es positivo, el motor está absorbiendo energía eléctrica para convertirla en energía mecánica. Mientras que si el par es negativo, en ese momento el motor se comporta como un generador, produciendo energía que luego se almacena en la batería [45].

Como forma de ejemplificar este efecto, se presenta en la figura 7.2 un diseño representativo del flujo de potencia en condiciones de aceleración del vehículo. En la misma se puede ver que el flujo de potencia se dirige desde la batería hacia el motor para luego ser transformada en potencia mecánica que será transmitida a las ruedas, generando de esta manera la propulsión del vehículo [45].

7.2. Funcionamiento del frenado regenerativo

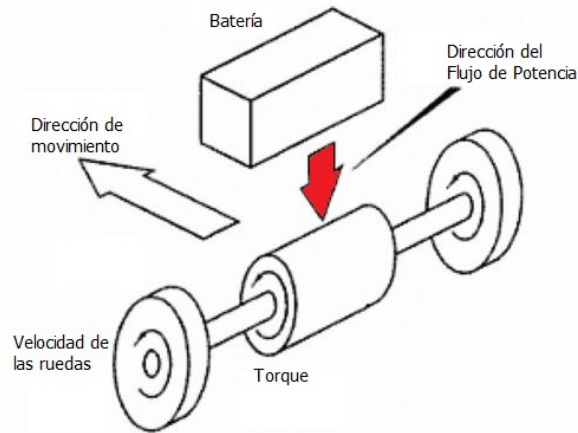


Figura 7.2: Esquemático del flujo de potencia en condiciones de aceleración del vehículo.

Por otro lado, al momento de accionarse el sistema de frenado regenerativo, se utiliza el motor para reducir la velocidad del vehículo, lo que implica que el mismo pase a funcionar como generador permitiendo que se recargue la batería. En la figura 7.3 se ejemplifica el flujo de potencia en condiciones de actuación del frenado regenerativo.

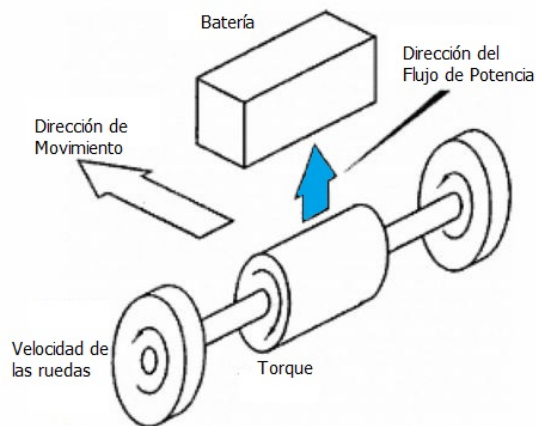


Figura 7.3: Esquemático del flujo de potencia en condiciones de funcionamiento del frenado regenerativo.

Finalmente, es preciso señalar que estos tipos de frenos funcionan eficazmente en situaciones de conducción con paradas y arranques, particularmente en zonas urbanas. El sistema de frenado regenerativo proporciona la mayor parte de la fuerza de frenado total durante el tráfico a baja velocidad. Es por este motivo que la regeneración de energía es más notoria en los circuitos urbanos que en los circuitos de ruta.

7.3. Beneficios del frenado regenerativo

El hecho de contar con el frenado regenerativo reduce la utilización de los frenos convencionales evitando el desgaste acelerado de los mismos. Esto conlleva a que los intervalos de tiempo entre mantenimientos sean mayores, siendo ésta una ventaja adicional que presenta el vehículo eléctrico con respecto al de combustión. Además, dado que ambos sistemas de frenado trabajan en conjunto, el poder de frenado necesario del sistema mecánico es menor que en un vehículo a combustión, por lo que el tamaño de los elementos se ve ligeramente reducido [46].

Otra de las ventajas que presenta este tipo de tecnología se refleja en el aumento de eficiencia energética del vehículo. La energía regenerada es reutilizada por el motor pudiendo así recorrer más kilómetros con una misma carga, lo que produce una mejora en la autonomía del vehículo. En términos económicos la capacidad de regenerar energía con el frenado se traduce en una reducción en los costos de recarga de la batería.

7.4. Limitaciones del frenado regenerativo

El frenado regenerativo presenta un poder de frenado menor que el de los convencionales. Esto se debe a que este sistema presenta limitaciones en su funcionamiento impuestos por otros componentes del vehículo. Los dos mayores elementos que limitan el funcionamiento son el motor eléctrico y la batería del vehículo.

La primer limitante se debe a la impuesta por la potencia máxima del motor. Debido a que en este sistema de frenado el motor funciona como generador, el mismo se ve limitado por su potencia nominal. Esto supone un problema dado que en frenados bruscos, la potencia requerida para desacelerar el vehículo es mayor que la nominal del motor, por lo que se debe hacer uso del sistema de frenado mecánico.

En cuanto al límite impuesto por la batería, el mismo se encuentra determinado por la potencia máxima de carga de la batería. Dicho valor de potencia depende de la química de la batería y de su capacidad, al igual que la temperatura de la misma [47].

Capítulo 8

Estudio de los BMS

En la actualidad, las baterías son parte de un número incalculable de dispositivos tecnológicos de uso doméstico e industrial. Por esta razón los fabricantes buscan constantemente la implementación de nuevas estrategias de protección con el fin de asegurar la correcta utilización de los mismos, así como también prolongar su vida útil.

Las baterías de litio son hasta el momento las que poseen mejores prestaciones en cuanto a precio y rendimiento. Sin embargo son sensibles a las altas y bajas temperaturas, produciendo éstas un deterioro acelerado o incluso la destrucción completa de las mismas [48].

8.1. Definición de BMS

Para lograr el funcionamiento esperado, las baterías vienen incorporadas con sistemas de gestión denominados BMS (*Battery Management System*). Estos sistemas están determinados por el modelo y química de las celdas, aumentando su complejidad de funcionalidades con el tamaño, configuración y propósitos de las baterías.

El BMS es el encargado de monitorear los parámetros de la batería, gestionando los límites de utilización permitidos para garantizar el máximo rendimiento sin el peligro de deteriorar o poner en juego la integridad de ésta. Los aspectos a gestionar están numerados en el siguiente listado [48]:

- Adquisición de datos.
- Limitar la máxima corriente de carga/descarga.
- Límites de tensión de las celdas.
- Balanceo de las celdas.
- Gestión de refrigeración.

8.2. Limitaciones impuestas a la batería

El sistema BMS es el encargado de regularizar el comportamiento interno de las celdas para que la batería tenga un funcionamiento correcto. El mismo es un sistema de control de suma importancia, ya que se encarga de mantener la integridad física de la batería. Uno de sus roles principales es monitorear la temperatura de la batería, dado que es uno de los mayores agentes que producen daños en la misma. Altas temperaturas de operación pueden llegar a ocasionar una expansión volumétrica e incluso explosión [48].

A su vez, el BMS deberá encargarse de:

- Evitar la sub tensión en las celdas, desconectando la carga en caso de ser necesario.
- Evitar la sobre tensión en las celdas, para ello se reduce la corriente de carga o de ser necesario detenerla.
- Desconectar el sistema si hay sobrecalentamiento.

En base a esto, se define un área de operación segura para las baterías (SOA - Safety Operation Area), la misma impone limitaciones en distintos parámetros para que la batería funcione correctamente. Estas limitantes impuestas son las siguientes:

- Tensión de carga máxima.
- Tensión de descarga máxima.
- Temperatura máxima y mínima de operación.
- Corriente de carga y descarga máxima.
- Pulsos de corriente máximos.

Para baterías del tipo Ión-Litio, los límites de la zona de seguridad se reflejan en la figura 8.1. Donde se muestran los efectos que ocurren al trabajar por fuera de dicha zona en función de la temperatura o tensión de la celda [49]. Es claro notar que las consecuencias a medida que se incrementa la temperatura serán cada vez mas severas.

8.2. Limitaciones impuestas a la batería

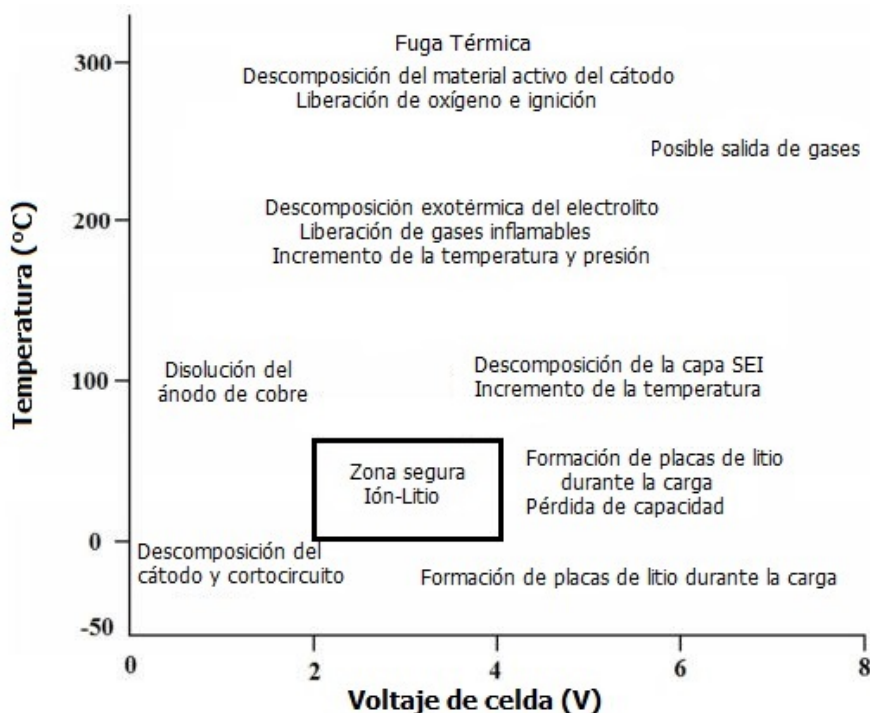


Figura 8.1: Zona de operación segura para baterías Ión-Litio [48].

Esta zona de trabajo seguro es una generalización para baterías del tipo Ión-Litio. La misma varía según el tipo de química que se utilice, presentando distintos rangos de operación en función de la temperatura y la tensión de la celda. Este efecto se ejemplifica en [48], donde se estudia la zona de operación segura para celdas con tipo de química LFP.

Como se puede apreciar en la figura 8.2, el SOA varía según la situación en la que se encuentre dicha celda, es decir, se diferencia el comportamiento de la misma ante una carga o una descarga donde se imponen los límites de temperatura, tensión y corriente para que dicha celda opere de manera correcta.

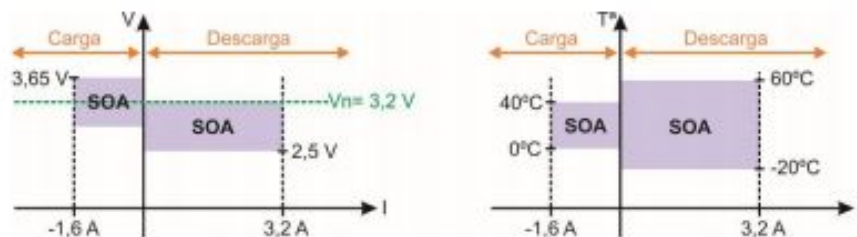


Figura 8.2: Área de operación segura para una celda de la química LFP [48].

8.3. Efectos en la batería por trabajar fuera del SOA

En este apartado se analizarán los efectos que se generan al salir de la zona de operación segura, ya sea por tensión o por temperatura. En el caso que se realice una sobrecarga a la batería, es decir que la tensión de celda máxima supere la tensión impuesta en el SOA, pueden ocurrir los siguientes efectos:

- **Sobrecalentamiento:** Un exceso de corriente en la carga incrementa el calentamiento de la celda por efecto Joule.
- **Formación de placas de litio:** Corrientes excesivas generan acumulación de los iones de litio en la superficie del ánodo, formando una placa de litio metálico “lithium plating”, lo que produce una disminución en la capacidad de la batería [50].

Para el caso que se realicen descargas profundas surgen los siguientes efectos:

- **Descomposición del material del ánodo:** El colector de corriente de cobre se disuelve en el electrolito [50].
- **Descomposición del material del cátodo:** Ocurre una descomposición constante y gradual del mismo, donde se liberan gases que producen un aumento sostenido de la presión dentro de la celda que puede provocar una explosión violenta de la misma si no se controla su salida [50].

Otro de los efectos que inciden en el desempeño de la batería es la temperatura la cual ocasiona daños severos sobre ella. A continuación se analizan las consecuencias de operar a temperaturas fuera del SOA:

- **Funcionamiento a baja temperatura:** Cuando se reduce la temperatura de la celda, disminuye la velocidad con la que se llevan a cabo las reacciones químicas dentro de ésta, ocasionando que la corriente que puede tolerar la batería durante la carga y descarga se vea decrementada. Esto origina una pérdida de potencia útil [50].
- **Funcionamiento a alta temperatura:** Para este caso se produce una degradación prematura de la celda. Es por este motivo que es necesario que se controle la temperatura y se refrigere la misma de manera de funcionar dentro de los márgenes de seguridad [50].

8.4. Control de corriente de carga de la batería

En esta sección se analiza el comportamiento de la corriente de carga de la batería ante alteraciones de la temperatura y el estado de carga de la misma. En la figura 8.3, se muestran los factores de carga, los cuales son un valor porcentual limitante por el que se multiplica la corriente [49].

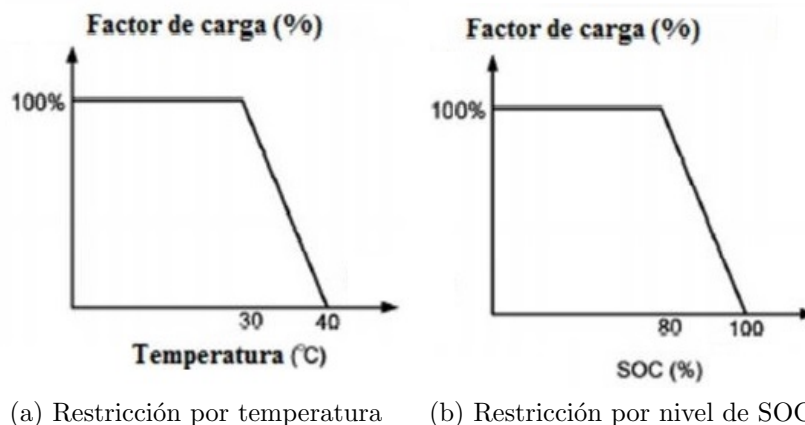


Figura 8.3: Factores limitantes de la corriente de carga según temperatura y SOC

Como se aprecia en la figura 8.3a, al realizar la carga de una batería, la misma debe efectuarse a temperaturas superiores a 0°C . En el caso que esto no se cumpla, algunos vehículos activan un calentador para llevar a la batería a dicha temperatura de funcionamiento aceptable. A su vez, para temperaturas entre los 30°C y 40°C , la carga se realizará de forma más lenta, limitando la corriente que ingresa a la batería con la finalidad de preservar su integridad física. Mientras que para temperaturas que sobrepasen los 40°C , el BMS actúa imposibilitando realizar dicha carga.

Otro de los factores que el BMS controla es el estado de carga de la batería (SOC), cuando el mismo es superior al 80 %, la corriente de carga se ve decrementada como consecuencia de una reducción del factor de carga. Véase figura 8.3b.

8.5. Control de corriente de descarga de la batería

En la presente sección se analiza el comportamiento de la corriente de descarga de la batería ante variaciones de temperatura y SOC de la misma. En la figura 8.4 se muestran las limitantes que el BMS impone a la corriente de descarga. Las mismas se realizan a través de factores de descarga que restringen a la corriente de la batería.

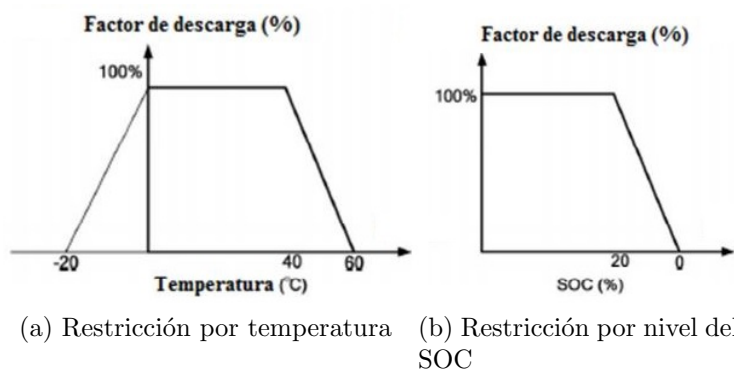


Figura 8.4: Factores limitantes de la corriente de descarga según temperatura y SOC

A la hora de analizar el comportamiento de la corriente en función de la temperatura, como se aprecia en la figura 8.4a, cuando el vehículo está en funcionamiento, la batería opera sin limitantes en la corriente para el rango de temperaturas de 0°C a 40°C . Sin embargo, cuando se trabaja a temperaturas entre -20°C y 0°C o dentro de los 40°C y 60°C , el BMS actúa limitando la corriente máxima de descarga.

Por otro lado, se observa como influye el estado de carga de la batería en el comportamiento de la corriente. Como se aprecia en la figura 8.4b, cuando el SOC es inferior al 20% el BMS actúa limitando la corriente de descarga.

8.6. Modelo térmico de la batería

Para monitorear la temperatura de la batería con el BMS y controlar que la misma no supere los límites establecidos por el SOA, es necesario conocer el modelo térmico de la batería, para así poder estimar los cambios de temperatura que puede sufrir la misma durante su funcionamiento. Para ello, se supone que la fuente de calor de la batería es a consecuencia del efecto Joule que produce la corriente al pasar por la resistencia interna de la batería. Por lo tanto, el calor generado en la batería se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{gen} = \int_0^t R_{int} * I^2 \quad (8.1)$$

Cuanto mayor sea la corriente que circule por la batería, mayor será el calor generado en la misma. Estas corrientes elevadas surgen como consecuencia de los picos de aceleración que presente el trayecto realizado. Una vez analizado el factor de generación de calor en la batería, se estudiarán los métodos con los cuales se disipa el calor en la misma. Por lo que en las siguientes secciones se abordarán estos efectos en profundidad.

8.6.1. Transferencia de calor por convección

Se entiende por convección una de las formas de transferir el calor, con las cuales se transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. En este caso, se representa la transferencia de calor de la batería al ambiente. En donde el calor que transfiere al ambiente se calcula utilizando la ley del enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{dis} = h * A * (T_2 - T_1) \quad (8.2)$$

Siendo Q_{dis} el calor disipado por la batería al entorno, h el coeficiente de transferencia de calor, A el área de la batería que está en contacto con el entorno y finalmente las temperaturas T_1 y T_2 son la del ambiente y la de la muestra respectivamente.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor h , en [51] se realiza el ensayo detallado en la figura 8.5. El mismo detalla que para obtener el valor de h , se calienta una batería de Ion-Litio destinada al uso en vehículos eléctricos, la cual está compuesta por celdas de 50 Ah. En dicho ensayo la misma se calienta con un calentador de silicona hasta llegar a los 40°C, donde la batería se encuentra aislada en todas menos en una de sus caras. Una vez estabilizada la temperatura, se elimina la fuente de calor ($\dot{Q} = 0$), por lo que se procede a medir la variación de la temperatura de la muestra y así obtener el valor de la variable desconocida h .

Capítulo 8. Estudio de los BMS

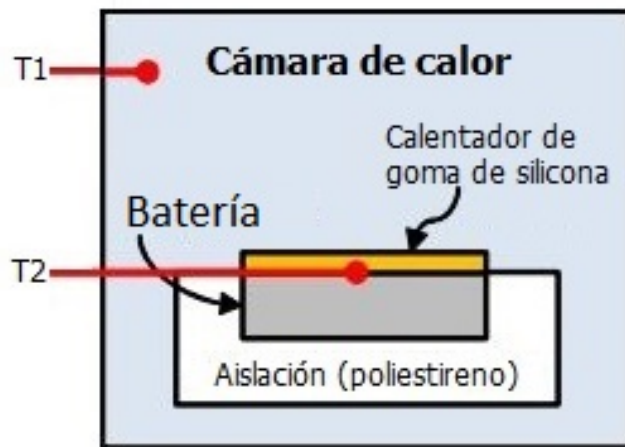


Figura 8.5: Ensayo para determinar el coeficiente de transferencia de calor de una cara de la batería.

Capítulo 9

Implementaciones realizadas

En este capítulo se presentan las implementaciones realizadas al software, las mismas toman como base los conocimientos teóricos desarrollados desde el capítulo 4 hasta el capítulo 8, lo cuales abarcan los siguientes temas: degradación de la celda de una batería, frenado regenerativo, estimación del estado de salud de las baterías - SOH, influencia de los tipos de carga, inclusión del vehículo genérico, trayecto dinámico y BMS.

9.1. Degradación de la celda de una batería

Uno de los principales efectos que se producen en la batería de los vehículos eléctricos usados es el aumento irreversible de su resistencia interna, como se expuso en el capítulo 4, donde la influencia de la edad y del ciclado de la batería presentan comportamientos lineales. De esta manera se representó en el modelo dicho fenómeno a través de dos factores que se detallan a continuación.

9.1.1. Factor degradación por ciclado

Para el cálculo de este factor se toman los resultados del estudio experimental [26] (6.5.4), realizado sobre una celda del tipo 18650 de la química NCA, en el cual se caracteriza la degradación de la resistencia interna de la celda en función del ciclado, simulado la realización de 200.000 km con frenado regenerativo a 25 °C. De dicho estudio se toma como referencia los datos recabados para la celda testeada para una tensión de carga de 4,1 V y un DoD del 41%. A partir de la información mostrada en dicho estudio, con la herramienta *Engauge Digitizer* se recaba la siguiente tabla de datos:

Capítulo 9. Implementaciones realizadas

Número de ciclos	Rint (Ω)
0	40,67
500	43,04
1000	46,57
1500	50,83
2000	54,81

Tabla 9.1: Degradación de la resistencia interna de una celda del tipo 18650 NCA según el número de ciclos de carga.

Linealizando los datos de la tabla 9.2, se creó una función que caracteriza el factor de degradación de la batería por ciclado que luego se implementó en Simulink.

$$Factor_degradación_por_ciclado_Rint(\%) = \frac{(0,007541 \times Ciclos + 39,49) \times 100}{39,49} \quad (9.1)$$

9.1. Degradación de la celda de una batería

9.1.2. Factor degradación por edad

Para caracterizar el aumento de la resistencia interna por parte de la degradación de la batería debido al paso del tiempo, se toman los resultados obtenidos del estudio [27] (3.2.1).

En dicho estudio se almacenan distintas celdas del tipo cilíndricas 18650 de alta densidad energética, de la química NMC a varios niveles de SOC y temperatura para representar la influencia de estas variables en la degradación de la resistencia interna.

Para calcular el factor implementado en el bloque de simulink se toman como base los resultados para la celda almacenada a temperatura ambiente igual a 20 °C y 75 % del SOC. A partir de la información mostrada en dicho estudio, con la herramienta *Engauge Digitizer* se recaba la siguiente tabla de datos:

Días de almacenamiento	Aumento resistencia interna (%)
0	0
30	0,732
90	1,553
128	2,322
158	3,065
189	4,193
218	4,783
251	5,937
290	7,578
318	7,654
346	9,449
387	9,988
409	11,167
440	11,885
475	14,269

Tabla 9.2: Aumento porcentual de la resistencia interna de una celda del tipo 18650 NMC según degradación según días de almacenamiento.

Linealizando los valores seleccionados se obtiene como resultado la siguiente función para el factor de degradación por edad expresada según años de almacenamiento.

$$Factor_degradación_por_edad_Rint(\%) = (0,096141 \times Años-batería + 1) \times 100(9.2)$$

9.1.3. Bloques implementados en Simulink

Una vez caracterizada la influencia en la resistencia interna por el paso del tiempo y el número de ciclos completos de la batería, se agregaron estos factores al modelo de bloques de la resistencia interna en Simulink. En la figura 9.1 se representa el diagrama de bloques que caracterizan a la resistencia interna de la batería, acompañado también de la influencia de la temperatura y SOC de ésta.

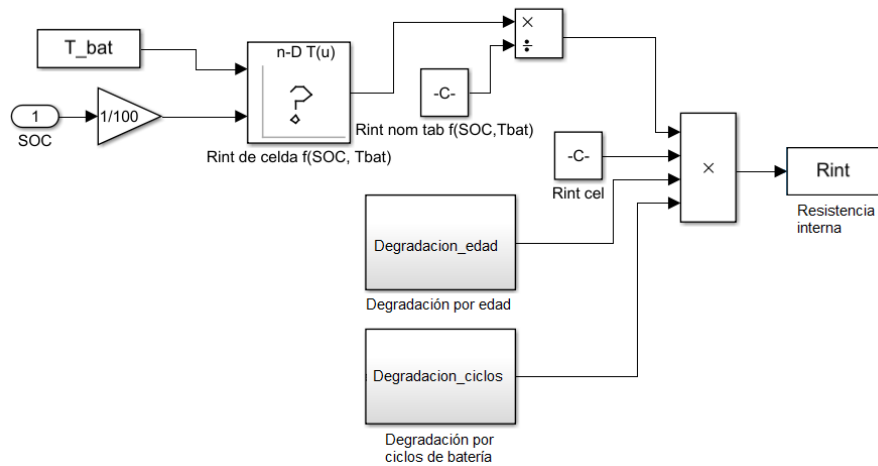


Figura 9.1: Bloque de caracterización de la resistencia interna influenciada por la edad, ciclos de batería, SOC y temperatura de la batería implementado en Simulink.

Como se puede apreciar figura 9.1, a partir del comportamiento según SOC y temperatura para una resistencia interna de batería genérica [1] se genera un factor de ajuste en función de estos parámetros. El mismo se multiplica por el valor de la resistencia interna para una determinada química de batería y los factores de degradación mencionados, dando de esta manera el valor buscado de la resistencia interna para una celda.

En la figura 9.2 se detalla un diagrama con la interacción de las distintas variables que caracterizan el valor de la resistencia interna por celda y las variables de salida del modelo que sufren un impacto negativo al degradarse la batería.

9.1. Degradación de la celda de una batería

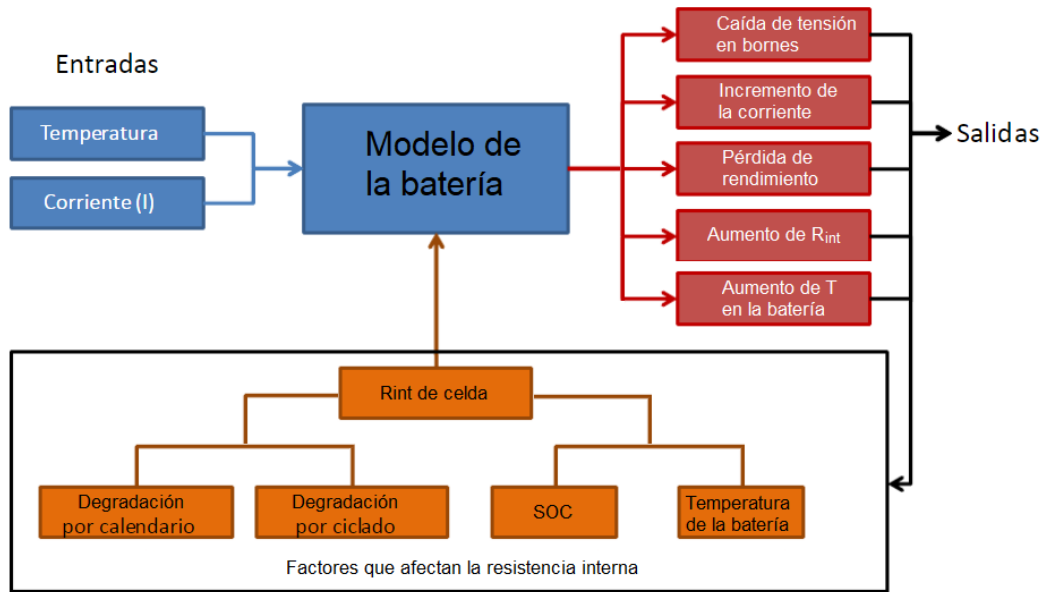


Figura 9.2: Diagrama del funcionamiento del bloque de degradación de la resistencia interna de la batería

9.2. Estimación del estado de salud de las baterías - SOH

Como se mencionó en el capítulo 6, la determinación del estado de salud de las baterías juega un rol primordial al momento de determinar la vida útil de un vehículo eléctrico y tiene como objetivo dar un tiempo de vida estimado de las baterías a partir de la cantidad de energía que son capaces de almacenar.

9.2.1. Algoritmo de SOH

Con el fin de conocer el estado de salud de las baterías se creó un algoritmo que se basa en la estimación de la energía que ésta es capaz de almacenar, tomándose las siguientes consideraciones:

- Energía total de la batería: Energía que la batería de un determinado vehículo nuevo es capaz de almacenar.
- Energía disponible: Energía que la batería de un determinado vehículo usado es capaz de almacenar.
- Energía consumida: Energía consumida por un determinado vehículo en determinado ciclo de conducción.

El funcionamiento básico del algoritmo es simular ciclos de carga y descarga de la batería a partir de datos recolectados de un determinado vehículo y ciclo de conducción elegidos, simulados previamente por el usuario. Además se solicita al usuario informar la cantidad de veces que quiere repetir dicho ciclo en una semana y el valor límite de SOH que desea estimar.

Durante la ejecución del algoritmo se aplican factores de degradación de la batería según influencia de la cantidad de ciclos y edad de la misma para una temperatura constante, actualizando de esta manera la energía disponible, así como también la energía consumida por el ciclo de conducción y hallando el valor del SOH (Véase ecuación 6.1).

La simulación llega a su fin una vez alcanzado el valor de SOH límite ingresado por el usuario y se despliega el tiempo de vida estimado y la cantidad de veces que puede repetirse el ciclo de conducción con el auto elegido por el usuario junto con la cantidad de kilómetros recorridos correspondientes a dichos ciclos. En la figura 9.3 se ejemplifica con un diagrama de flujo dicho funcionamiento para un valor límite de $SOH = 80\%$.

9.2. Estimación del estado de salud de las baterías - SOH

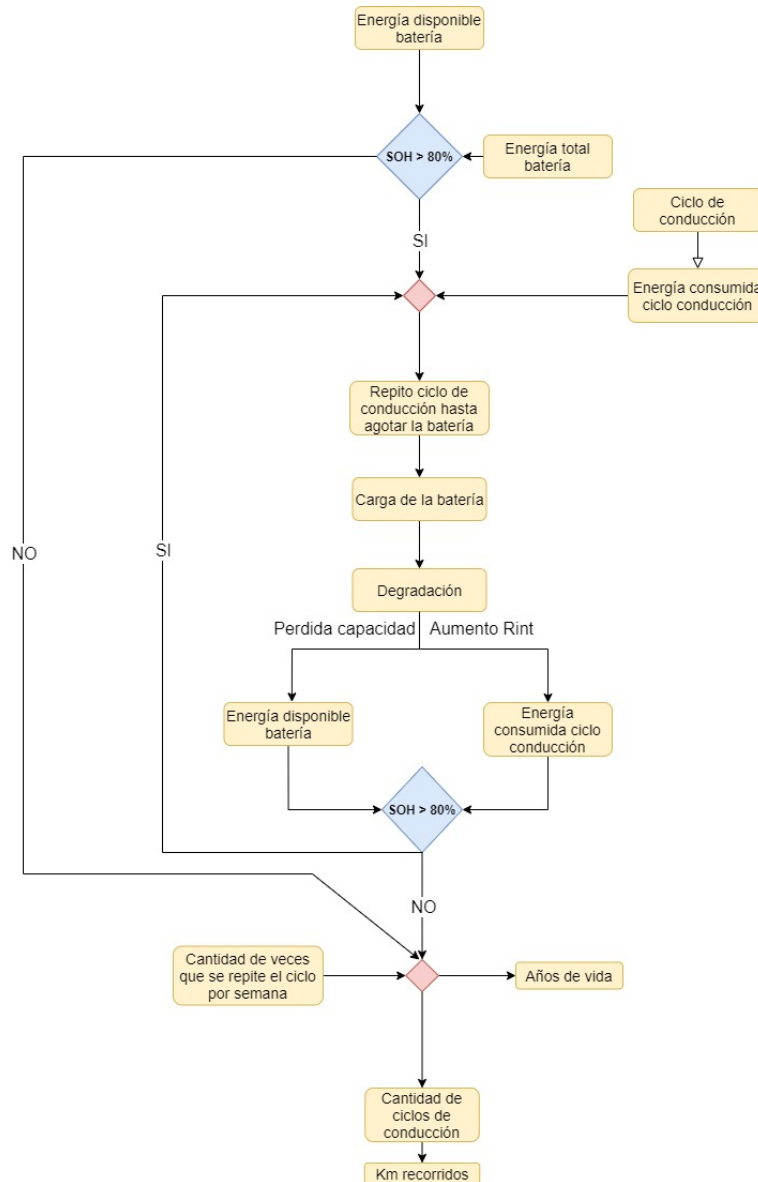


Figura 9.3: Diagrama de flujo del algoritmo de estimación del SOH de la batería para un valor límite $SOH = 80\%$.

La pérdida de capacidad así como también el aumento de la resistencia interna ponen de manifiesto la degradación de la batería. A pesar de ser fenómenos estudiados de forma independiente ambos responden a la degradación por ciclado y por edad que sufre la batería.

Dichos efectos son estudiados y mostrados en distintas literaturas a través de la experimentación con baterías reales. Con la ayuda de la herramienta *EngaugeDigitizer* se logra parametrizar las curvas de dichos efectos para nuestro provecho.

Según el estudio realizado en [41] donde se observa el comportamiento de la

Capítulo 9. Implementaciones realizadas

pérdida relativa de capacidad según edad en 146 celdas de 20Ah con química NMC, se denota que el mismo responde a un comportamiento lineal con pendiente positiva.

La parametrización para este efecto queda determinada según la ecuación 9.3 donde se considera la curva para un $SOC = 80\%$ de almacenamiento.

$$C_{perdida} = 0,004524 * días \quad (9.3)$$

9.2.2. Influencia de los tipos de carga

A la hora de considerar las pérdidas de capacidad por ciclado, como fue estudiado en el capítulo 5, se utilizó como base para la implementación, las diferentes curvas de carga que fueron presentadas en la figura 5.2. En donde las curvas describen un comportamiento lineal del estado de salud de la batería al variar la tasa de carga. Si bien el gráfico del estudio realizado en [31] muestra la incidencia en el SOH solamente hasta los 250 ciclos completos de la batería, mediante la herramienta *Engauge Digitizer*, se determinaron las pendientes correspondientes para cada uno de los tipos de carga y se obtuvieron las curvas de carga genérica en función de los ciclos de la batería. Por lo tanto, se implementaron las siguientes curvas de carga:

- **Carga a 0.5C:** $SOH = -0,01641 \times Ciclos + 100$

- **Carga a 1C:** $SOH = -0,01865 \times Ciclos + 100$

- **Carga a 2C:** $SOH = -0,01963 \times Ciclos + 100$

Como en 5.2, es claro denotar que cuando se realiza una carga de la batería con un C_{rate} (tasa de carga) de $0,5C$, las pérdidas de capacidad son menores que cuando se impone una tasa de carga de $1C$. Por su parte, esta última genera menos pérdidas de capacidad que para cargas realizadas a $2C$ donde se verifica lo anteriormente estudiado, que cuanto mayor sea la tasa de carga de la batería, mayor será la pérdida de capacidad en la batería.

Suponiendo que se decide cargar el vehículo en una estación de carga, en donde el suministro de potencia del SAVE es de $P_{Generador} = 22 \text{ kW}$. En el caso que la potencia del cargador del vehículo sea menor a la del SAVE, se realiza una carga a la potencia limitante, es decir que se realiza una carga a la potencia máxima admisible por el cargador de la batería. Ahora suponiendo el caso en que el cargador del vehículo tolera los 22 kW que suministra el generador; para este supuesto la corriente con la que se cargará la batería será de:

$$I_{carga} = \frac{P_{carga}}{V_{bateria}} = \frac{22 \text{ kW}}{360 \text{ V}} = 61,11 \text{ A} \quad (9.4)$$

Por lo tanto, para este caso planteado la batería del vehículo eléctrico se cargará a una tasa de carga de $1C$, en donde en 1 hora se llegaría al 100 % de su carga.

En base a esto, lo que se implementó es la opción de que el usuario elija con qué potencia desea cargar el vehículo y para ello ver los efectos que se generan en el estado de salud de la batería al variar la carga. Las opciones de carga son las siguientes:

Capítulo 9. Implementaciones realizadas



Figura 9.4: Implementación en software.

Como anteriormente fue explicado, al momento en que el usuario elige el tipo de carga que desea realizar, el sistema evalúa si esa potencia es admitida por el cargador del vehículo previamente seleccionado. En el caso que no lo sea, la potencia de carga que toma el sistema será la del cargador del vehículo, mientras que en el caso de que sea tolerable, el sistema determina como potencia de carga la seleccionada por el usuario.

Una vez determinada la potencia, se estableció el siguiente criterio para seleccionar con qué curva de carga caracterizada se realiza la carga del vehículo. Para ello se considera que si la tasa de carga es inferior a $0,7C$, la curva de carga elegida será la correspondiente a $0,5C$. Mientras que si $0,7C < C_{rate} < 1,5C$ la curva seleccionada es la de $1C$. Por último, si la tasa de carga es superior a $1,5C$, se elige la curva correspondiente a $2C$.

9.3. Frenado Regenerativo

En esta sección se desarrollarán las implementaciones que se realizaron en el software en lo que respecta al frenado regenerativo. Para ello se realiza un ajuste de la energía que se regenera para determinado ciclo basándose en un estudio realizado por terceros.

9.3.1. Ajuste de la energía regenerada

Con el objetivo de mejorar la estimación de la energía que es recuperada para determinado ciclo de conducción, se recaba el dato de cuánta es la energía que se regenera en un ciclo de conducción que se caracteriza por la unión de un trayecto de manejo en ciudad y manejo extra urbano. En [52] éste ciclo es denominado "Route 2", donde dicho estudio se realizó con el Nissan Leaf de 22 kWh y el ciclo se caracterizó por contar con una velocidad máxima de 90km/h . Dada la similitud del ciclo de conducción de dicho ensayo con la del ciclo de homologación WLTP clase 2 (ver capítulo 3.2), se procede a realizar el ajuste de la energía que se regenera en dicho ciclo para el vehículo mencionado.

Si se analizan los resultados reflejados en el ensayo [52], se obtiene que ante una temperatura ambiente de $T = 27^\circ\text{C}$, el porcentaje de la energía recuperada por la batería frente a la energía consumida por la misma es de un 27,5% (E_{inBat}/E_{outBat}). Por lo que en base a este resultado se procedió a realizar la simulación para el ciclo de conducción WLTP clase 2 con el Nissan Leaf precargado en el sistema, para así analizar los resultados. Donde en la figura 9.5, se muestra el resultado de la energía que se consume en dicho trayecto.

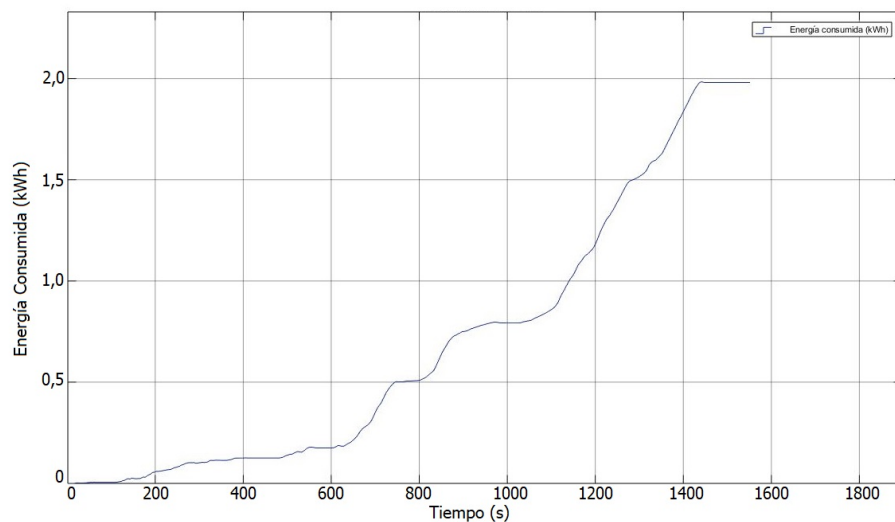


Figura 9.5: Simulación de la energía consumida en ciclo WLTP clase 2 Nissan Leaf.

Como se puede apreciar el consumo para dicho trayecto es de $E_{consumida} = 1,984\text{ kWh}$. En cuanto a la energía que se recupera con el frenado, anteriormente

Capítulo 9. Implementaciones realizadas

se podía observar que para la simulación del ciclo correspondiente, la energía regenerada era superior a los resultados esperados teóricamente, ya que la misma debe ser $E_{regenerada} = 0,536 \text{ kWh}$ ($0,275 \times E_{consumida}$), por lo que se procede a realizar el ajuste correspondiente y así generar un modelo que cumpla con un resultado más ajustado al valor teórico. Para ajustar el valor de la energía regenerada en el ciclo, se procede a cambiar las limitaciones impuestas tanto para la potencia del frenado, como para el torque requerido. Donde se reduce el límite en el bloque controlador para ambos parámetros y se fija a la limitante en $\frac{P_{nom_{máxima}}}{2,5}$.

A su vez este bloque tiene el siguiente funcionamiento, una vez que se detecta que la variable correspondiente a la aceleración es negativa, comienza a actuar la parte inferior del bloque mostrado en la figura 9.6.

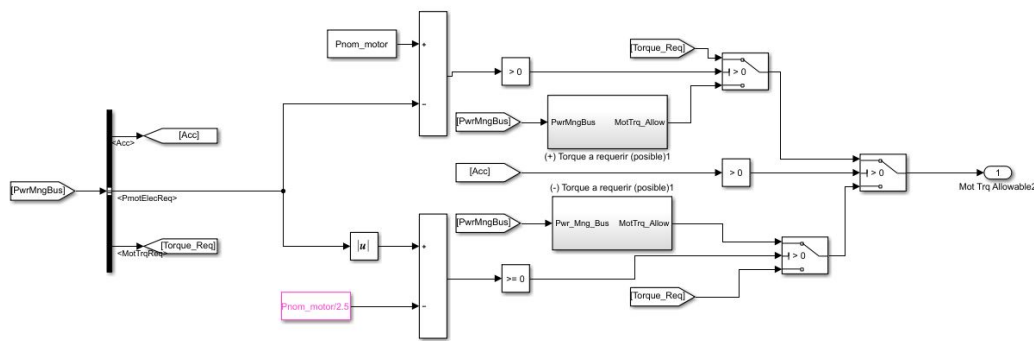


Figura 9.6: Ajuste de limitación para la Potencia de frenado regenerativo.

Después que se detecta una aceleración negativa, el motor automáticamente comienza a funcionar como un generador, en donde la corriente pasa a ser negativa al igual que la potencia eléctrica de la batería.

Como anteriormente fue mencionado, lo primero que se realiza es limitar la potencia, por este motivo es que se plantea la resta entre valor absoluto de la Potencia requerida por el motor y la Potencia nominal del motor sobre 2,5. Si el resultado de esta operación es positivo, esto significa que se le está solicitando al motor una potencia superior al límite de regeneración del sistema. Por este motivo es que se procede a fijar el torque requerido para abastecer la potencia de frenado regenerativo bajo esta limitante, esto se realiza en el bloque llamado “Torque a requerir (posible)”, como se aprecia en la figura 9.7.

9.3. Frenado Regenerativo

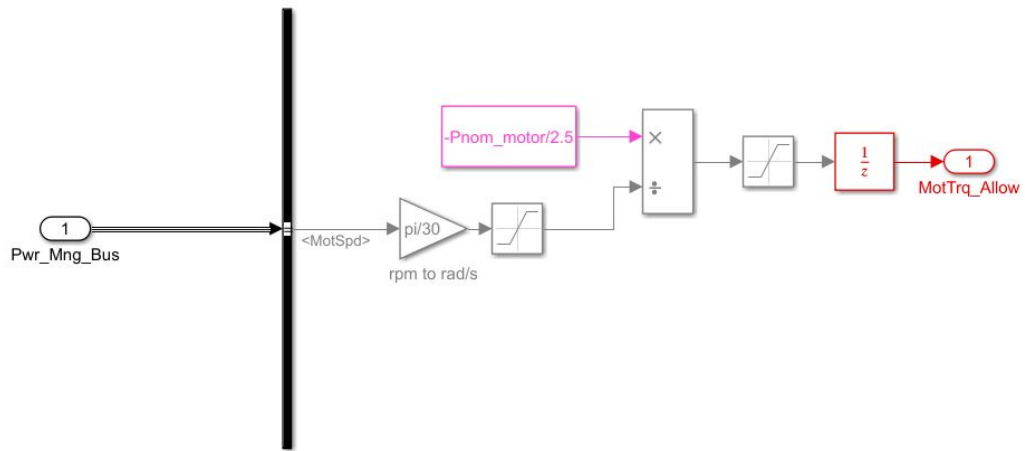


Figura 9.7: Torque máximo para la Potencia de frenado regenerativo limitada.

A su vez, si la potencia requerida por el motor es inferior al límite impuesto anteriormente, es decir que la resta es negativa, se procede a indicar que el torque requerido es el correcto y la potencia no necesita de limitación alguna.

Por lo tanto, una vez realizadas las modificaciones pertinentes, se tiene que la $E_{regenerada} = 0,549kWh$, donde si bien el resultado no es exactamente el mismo que el requerido previamente por el estudio realizado, se puede afirmar que el mismo es correcto, ya que el error relativo es pequeño con respecto a la medida esperada de regeneración ($E_{regenerada} = 0,536 kWh$).

Por otro lado, una vez realizado dicho ajuste, se vio que se podía agregar opción de visualizar la gráfica correspondiente a la potencia que se recupera a través del frenado regenerativo, la cual previamente no estaba previsto en el sistema. Por lo que se decidió agregarlo como mejora en la herramienta. Para lograrlo, se filtra la potencia negativa en la batería, la misma corresponde a corrientes menores a cero, las cuales aparecen cuando el auto comienza a desacelerar y de esta forma se produce la regeneración de energía. En la figura 9.8 se obtiene el gráfico correspondiente a la potencia de frenado regenerativo que se recaba al simular un ciclo de conducción WLTP de clase 2 para el Nissan Leaf.

Capítulo 9. Implementaciones realizadas

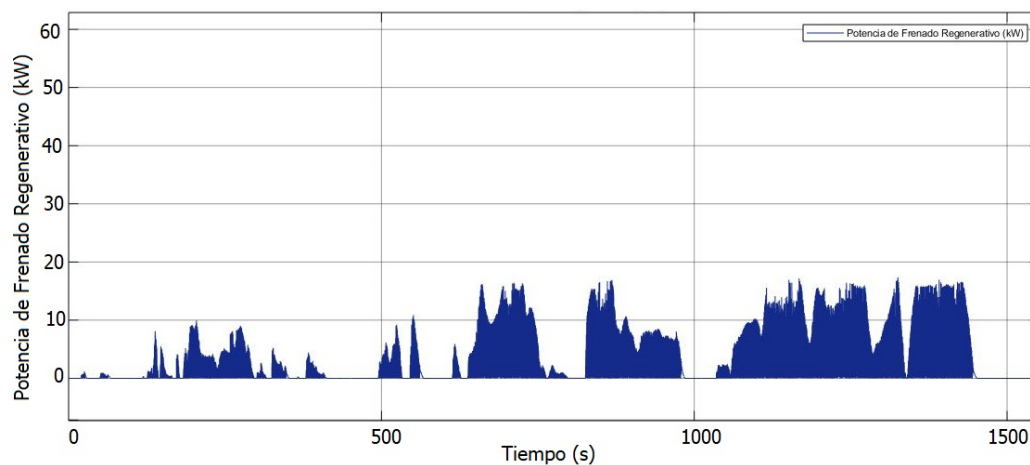


Figura 9.8: Potencia de frenado regenerativo para Nissan Leaf.

Como se puede ver la misma es mostrada luego de aplicado el valor absoluto, de forma tal que el resultado sea más claro para el usuario. A su vez, se aprecia que la potencia máxima de regeneración equivale a 18.70 kW.

Para el cálculo de la energía recuperada, como la energía es la integral de la potencia en el tiempo, lo que se procede a hacer es colocar un bloque integrador luego de la potencia, para así mostrar la gráfica correspondiente a la energía que se regenera por ciclo. En base a esto es que se llega a que $E_{regenerada} = 0,549 \text{ kWh}$. La misma se puede ver en la siguiente figura 9.9

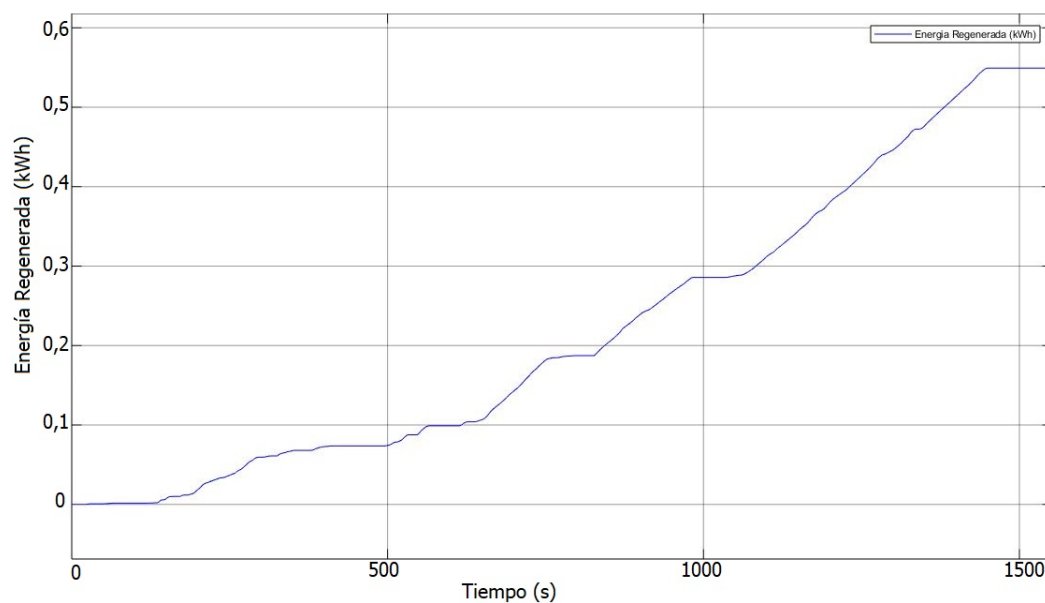


Figura 9.9: Energía regenerada para Nissan Leaf WLTP clase 2.

9.4. Inclusión del Vehículo Genérico

A los efectos de este proyecto, se entiende por vehículo genérico aquel que no se encuentra cargado previamente en el software, es decir, aquel que no fue incluido como vehículo de prueba y del cual se desconocen sus características. Dado que la idea general del presente proyecto es dotar a un usuario de una herramienta que permita conocer el funcionamiento de los vehículos eléctricos, es de esperar que el mismo sea capaz de realizar simulaciones en una gran variedad de vehículos y no sólo en los ya predefinidos.

Apuntando a esa carencia, se incluye en el software la posibilidad de ingresar un vehículo genérico. Con él, el usuario podrá realizar simulaciones de la misma manera que si fuera un vehículo previamente incluido en el sistema, lo que incluye visualizaciones de las magnitudes de interés, estimación del estado de salud de la batería (SOH), posibilidad de cambiar parámetros y carga/descarga con la red. El mismo puede encontrarse en el listado de vehículos de posible elección.

9.4.1. Aspectos generales del vehículo genérico

Dado que se desconoce el vehículo genérico, es necesario crear un modelo del mismo para poder realizar su simulación. Para ello el usuario debe ingresar ciertos datos de interés para poder generar un modelo que se asemeje al vehículo a simular.

A continuación se detallan los parámetros necesarios para el modelado del vehículo genérico y su efecto en el mismo:

- **Tamaño de rueda:** Como forma de guiar al usuario el sistema permite elegir entre distintos tamaños, los cuales corresponden a los tamaños de rueda existentes en los vehículos cargados en el sistema. Los mismos son:
 - 235/65 R17
 - 205/55 R16
 - 195/55 R16
 - 195/65 R15
 - 165/65 R15

Este valor se utiliza junto con otros para estimar la aceleración máxima del vehículo y torque del motor, por lo tanto es un parámetro que incide en el rendimiento.

- **Masa del vehículo:** Es un parámetro que naturalmente se desea conocer y da una idea del porte del vehículo. Dicho valor influye en el comportamiento general del mismo, afectando principalmente el consumo y aceleración máxima.
- **Potencia máxima:** Hace referencia a la potencia máxima del motor, al igual que con los vehículos a combustión es un parámetro que indica la potencia que el motor es capaz de entregar a la transmisión, influyendo en la aceleración y velocidad máxima del vehículo.

Capítulo 9. Implementaciones realizadas

- **Torque máximo:** Influye en el cálculo de la transmisión del vehículo y da una idea de la capacidad del vehículo de seguir los requerimientos de velocidad que imponga el ciclo de conducción.
- **Voltaje de la batería:** A partir de ese valor se estima la cantidad de celdas en serie que presenta la batería, además permite calcular la potencia brindada por la batería dado los requerimientos de corriente dictados por el ciclo de conducción.
- **Capacidad de la batería:** Define el tamaño de la batería y da idea de la cantidad de energía que la misma es capaz de almacenar. Junto con el voltaje de la batería son los parámetros que definen la alimentación del vehículo. Es un parámetro de vital importancia dado que afecta directamente la autonomía del vehículo.
- **Química de la batería:** Parámetro que define el valor de la resistencia interna de las celdas que componen la batería del vehículo. A partir de los voltajes conocidos de celdas de este tipo de química y con el valor del voltaje de la batería del vehículo se estima la cantidad de celdas en serie. Al igual que con el tamaño de rueda el usuario puede elegir entre tres tipos de química:
 - NMC
 - LMO
 - LFP
- **Tipo de auto:** Este parámetro nos permite conocer la forma del vehículo y a partir de ella hallar sus características aerodinámicas, influye en la aceleración máxima del vehículo y en su autonomía. Es posible elegir entre los siguientes tipos de auto:
 - Hatchback
 - Suv
 - Sedan
 - Utilitario

9.4.2. Modelado del vehículo genérico

Como forma de generar el modelo del vehículo de interés para el usuario, se toma como base la definición de los parámetros de los vehículos cargados en el sistema. Es decir, en base a los parámetros ingresados por el usuario se genera el modelo solicitado utilizando las mismas ecuaciones que se utilizan en los vehículos cargados en el sistema o bien tomando parámetros de otros vehículos semejantes ya ingresados. Esta información será luego utilizada por simulink para realizar las simulaciones.

9.4. Inclusión del Vehículo Genérico

Tamaño de rueda

Comenzando con el tamaño de rueda, cabe definir previamente el formato en el que se ingresa dicho parámetro. El mismo consiste en tres números ordenados de la siguiente manera:

$$X/YRZ \quad (9.5)$$

donde “X” denota la anchura máxima del neumático expresada en milímetros, “Y” es el alto del neumático expresado en porcentaje de la anchura y por último “Z” es el diámetro interno del neumático expresado en pulgadas y medido de forma radial aclarado por la letra “R”. A partir de estas definiciones se realizan los cálculos de tamaño de la rueda.

Para comenzar se realiza el pasaje del diámetro de la llanta a centímetros.

$$diámetro_llanta = Z * 0,0254 \quad (9.6)$$

Luego se calcula el espesor de la cubierta tomando como consideración que la cubierta se introduce unos dos centímetros dentro de la llanta.

$$espesor_cubierta = \left(\frac{Y}{100} * X\right) - 0,02 \quad (9.7)$$

Finalmente se calcula el radio total de la rueda como la suma del radio de la llanta y el espesor de la cubierta, este valor será luego utilizado por el tren motriz de simulink para realizar las simulaciones.

$$radio_rueda = radio_llanta + espesor_cubierta \quad (9.8)$$

Peso del vehículo

Este valor ingresado por el usuario simplemente se almacena para su uso posterior. Dado que cada fabricante realiza el diseño de su vehículo teniendo en cuenta el peso para lograr un rendimiento óptimo, es un parámetro que no puede ser obviado.

Potencia máxima

Es un parámetro que caracteriza el motor del vehículo a modelar y define la potencia que el mismo es capaz de entregar al vehículo, al igual que el peso del vehículo, éste se almacena y es luego utilizado en las simulaciones.

Torque máximo

Este parámetro al igual que los anteriores simplemente se almacena para su utilización posterior. En conjunto con la potencia máxima del motor caracterizan completamente al motor del vehículo genérico.

Capítulo 9. Implementaciones realizadas

Voltaje de la batería

Caracteriza el pack de baterías del vehículo a modelar y es posteriormente utilizado para calcular la cantidad de celdas y la capacidad en Ah que presenta dicho pack. A su vez se utiliza en las simulaciones para determinar la potencia que entrega la batería.

Capacidad de la batería

Este valor define las limitaciones de potencia de la batería. Este parámetro se almacena.

Química de la batería

Dado las distintas químicas de baterías que existen hoy en día en el mercado, este parámetro no se debe pasar por alto. Los tipos de química posibles de elegir corresponden a los tipos de químicas que ya se encuentran en los vehículos cargados en el sistema. A partir de ella se define el valor de la resistencia interna de cada celda, el cual se encuentra definido en el software para ese tipo de química en particular. Los valores de resistencia utilizados según tipo de química se muestran a continuación:

- **NMC:** $R_{int} = 0,0015\Omega$
- **LMO:** $R_{int} = 0,0008\Omega$
- **LFP:** $R_{int} = 0,0006\Omega$

A su vez, a partir del tipo de química, se estima la cantidad de celdas en serie y paralelo que presenta el pack de baterías.

Dado que la mayoría de los packs de baterías que se encuentran hoy en día en el mercado tienen una configuración con dos celdas en paralelo, es decir, $N_p = 2$, se considera para este modelado ese valor. Para el cálculo de la cantidad de celdas en serie del pack, es decir N_s se utilizan valores típicos de voltaje de celda en conjunto con el voltaje de la batería del pack. Estos valores se toman de los vehículos cargados en el software según el tipo de química y se relacionan con el voltaje del pack de la siguiente manera:

$$N_s = \frac{\text{Voltaje_de_batería}}{\text{Voltaje_de_celda}} \quad (9.9)$$

Los valores de voltaje de celda utilizados son los siguientes:

- **NMC:** $V_{cell} = 3,6V$
- **LMO:** $V_{cell} = 3,75V$
- **LFP:** $V_{cell} = 3,2V$

Para la curva de voltaje de circuito abierto, la misma se copia de los siguientes vehículos según el tipo de química:

9.4. Inclusión del Vehículo Genérico

- **NMC:** Renault ZOE 41kWh
 - **LMO:** Nissan Leaf
 - **LFP:** BYD e6

Tipo de vehículo

La elección de este parámetro define el comportamiento del auto según el tipo que elija el usuario. Busca asemejarse a los vehículos del mismo tipo que se encuentran cargados en el sistema, en términos de coeficientes aerodinámicos, consumos del vehículo, valores de transmisión y aceleración con la salvedad de los parámetros definidos por el usuario y los calculados a partir de ellos. Según el tipo elegido los vehículos que toma como modelo son los siguientes:

- **Hatchback:** Renault ZOE 22kWh
- **Suv:** BYD Yuan
- **Sedan:** BYD e6
- **Utilitario:** Renault Kangoo ZE 22kWh

Como comentario general de esta implementación, la misma se encuentra en la coyuntura entre simpleza de utilización de la herramienta por parte del usuario y efectividad del modelo del vehículo genérico. Para obtener un modelo más completo del vehículo genérico de interés, es necesario aumentar la cantidad de información que debe brindar el usuario, la cual en muchos casos podría llegar a ser muy específica y exceder el entendimiento sobre el tema por parte del usuario, así como también aumentar la dificultad de obtención de los mismos. Es por ello que se optó por llevar a cabo esta implementación de la manera descrita previamente manteniendo de esta forma la simpleza de la herramienta.

9.5. Inclusión del trayecto dinámico

Dado que el proyecto base contaba con un número limitado de trayectos disponibles para simular, se decide la adición de un método en que se pueda cuantificar el consumo y costo que tiene completar un trayecto urbano que sea de interés para el usuario. De esta forma se le ofrece la posibilidad de hacer un estimativo de la energía consumida así como del costo que le demandaría realizarlo en un automóvil eléctrico entre dos puntos que le sean de interés, como por ejemplo de su casa al trabajo. Dada la utilidad que tiene comparar costos con otro medio de transporte tradicional, esta herramienta puede llevar al usuario a efectivizar la elección de hacerse propietario de un vehículo eléctrico en el futuro.

Conociendo la distancia real entre los dos puntos elegidos por el usuario, el rendimiento promedio en circuitos urbanos para el modelo de vehículo eléctrico seleccionado y la tarifa a la que se desea cargar el automóvil se realiza un estimativo de la energía consumida en el viaje y el costo del mismo.

9.5.1. Visualización de mapas georeferenciados

Para la visualización de los mapas necesarios para el funcionamiento de la herramienta *Trayecto Dinámico* se utilizó distintas funcionalidades de las APIs de Google Maps. La sigla API significa Interfaz de Programación de Aplicaciones (Application Programming Interface) haciendo referencia a un conjunto de aplicaciones y procedimientos creados con el fin de generar una interfaz inteligente, configurando un medio por el cual dos sistemas se pueden comunicar.

Centrándonos en las APIs de Google Maps, éstas son un conjunto de interfaces de programación de aplicaciones que permiten la comunicación de los servicios ofrecidos por la empresa a aplicaciones desarrolladas por terceros. Este conjunto de funciones ofrecidos por Google están divididos en tres grandes grupos: *Maps*, *Routes* y *Places* [53]. Para la implementación del trayecto dinámico se hicieron uso de funciones pertenecientes de los dos primeros.

Si bien Google ofrece de forma gratuita el uso de muchas de sus APIs, la empresa se reserva funciones específicas exclusivamente para la modalidad paga. Para el desarrollo de esta funcionalidad fue necesario crear un usuario asociado a una tarjeta de crédito habilitado a la facturación por el uso de los servicios. El titular cuenta con un crédito gratuito de 200 USD mensuales, en el que solo se le facturará el costo de los servicios utilizados que sobrepasen dicho monto. El monto consumido se calcula dependiendo de la cantidad de ejecuciones que se realizan de las funcionalidades. Cabe destacar que el monto gratuito mensual que la empresa nos habilita a utilizar fue más que suficiente para la etapa de desarrollo y pruebas del software, no teniendo así cargos adicionales en la factura.

Para mostrar el mapa donde el usuario elije los puntos de origen y destino del trayecto se creó una función de Matlab que utilizan la herramienta *Maps Static API* anteriormente mencionada. Al ejecutar dicha función se grafica un mapa georeferenciado donde los ejes representan los valores de latitud y longitud. Para seleccionar los puntos de origen y destino, el usuario puede realizar zoom a la

9.5. Inclusión del trayecto dinámico

imagen y desplazarse por la misma, teniendo un ajuste automático de la escala y de los ejes de coordenadas.

9.5.2. Distancia del trayecto deseado

Para obtener la distancia del trayecto deseado por el usuario, se creó una función en conjunto con la API *Distance Matrix* de Google, en el que registrando las coordenadas de origen y destino seleccionadas, se devuelve la longitud del trayecto óptimo entre esos dos puntos, respetando las señalizaciones viales, así como también un estimativo del tiempo que llevará realizar dicho viaje.

Además de los datos mencionados, al ejecutar ésta función también se despliega una ventana de navegador de internet que muestra al usuario un mapa con el trayecto seleccionado resaltado, el cuál sirve para cerciorar de que el trayecto elegido es el correcto y al mismo tiempo informar cuál es el recorrido del mismo.

9.5.3. Cálculo del consumo

En cuanto a la estimación de la energía consumida en el trayecto, ésta se calcula multiplicando el resultado de la distancia del recorrido mencionado anteriormente por el rendimiento urbano del vehículo elegido. Para conocer dicho rendimiento urbano, que se expresa en $\frac{kWh}{km}$, se simuló cada modelo de vehículo disponible en el trayecto *Montevideo completo*, debido a que éste representa de mejor manera el perfil de velocidades en uso urbano, que los ciclos WLTP o NEDC. Dividiendo el consumo obtenido entre la distancia del recorrido se concluye así el rendimiento promedio a utilizar. De esta manera se calcularon los rendimientos a utilizar para cada vehículo, los cuáles se pueden observar en la tabla 9.3.

Vehículo	Consumo (kWh)	Rendimiento ($\frac{kWh}{km}$)
Renault Kangoo ZE 22 kWh	8.59	0.203
Renault ZOE 41 kWh	8.46	0.200
Nissan Leaf	10.98	0.259
BYD E6	14.08	0.332
Volkswagen E-up!	7.83	0.185
Renault Kangoo ZE 33 kWh	8.19	0.193
Renault ZOE 22 kWh	7.66	0.181
BYD YUAN	8.42	0.199

Tabla 9.3: Consumos y rendimientos promedio por vehículo, calculados a partir de la simulación del ciclo Montevideo completo.

Capítulo 9. Implementaciones realizadas

9.5.4. Tarifas eléctricas

Dado que en la actualidad UTE ofrece una variedad de tarifas eléctricas que buscan satisfacer a las necesidades de distintos clientes, en esta sección se busca interiorizar al lector con cada una de ellas. Dado que el costo de energía es una de las temáticas más importantes a la hora de pensar en hacer el cambio a la movilidad eléctrica, se agregó al software la posibilidad de elegir la tarifa con la que el usuario planea cargar el vehículo eléctrico, mostrándole a éste el costo que conllevaría realizar el trayecto elegido en la funcionalidad *Trayecto dinámico*. Dicho costo se calcula multiplicando el consumo del viaje en kWh por un factor de rendimiento proveniente del cargador del vehículo, así como también por la tarifa seleccionada. De esta manera expresa en la tabla 9.4 los distintos tipos de tarifas que brinda UTE a sus clientes, teniendo en cuenta solamente las modalidades de tarifas residenciales que figuran en el pliego tarifario [54].

Tarifa	Franja	Horario	Precio de energía (\$/kWh)
Simple	1 kWh a 100 kWh	Sin horario	5.701
	101 kWh a 600 kWh	Sin horario	7.147
	601 kWh en adelante	Sin horario	8.911
Doble Horario	Punta	De 17:00 a 23:00 hs	9.524
	Fuera de Punta	Resto del día	3.816
Triple Horario	Punta	De 17:00 a 23:00 hrs	9.524
	Llano	De 07:00 a 17:00 y de 23:00 a 24:00 hrs	5.166
	Valle	De 00:00 a 07:00 hrs	1.994
Movilidad Eléctrica	Punta	De 18:00 a 22:00 hrs	15.032
	Llano	De 07:00 a 18:00 y de 22:00 a 24:00 hrs	5.754
	Valle	De 00:00 a 07:00 hrs	3.094

Tabla 9.4: Tarifas eléctricas ofrecidas por UTE según modo contratado.

9.6. Inclusión del sistema de control de la batería - BMS

En esta sección se detallan las implementaciones que se realizaron en el software en lo que respecta al sistema de gestión de batería (BMS). Para ello, como fue explicado en el capítulo 8, se establecen límites para que la batería trabaje de forma segura, es decir que opere dentro del área de operación segura (SOA).

En primer lugar se diseña el modelo térmico de la batería, para ello como fue explicado en el capítulo 8 se considera a la resistencia interna como el factor principal que incide en el calentamiento de la batería, en donde la corriente que pasa por la misma genera que se disipe la potencia en forma de calor. Esto conlleva a que la batería eleve su temperatura.

A su vez, para trayectos con mayor exigencia, debido a la gran demanda de corriente, el calentamiento de la batería será prematuro con respecto a un trayecto de menor exigencia.

9.6.1. Calentamiento de la batería

Se comienza con el cálculo del calor que es generado en la batería, para ello se modela en la figura 9.10 la energía térmica que se obtiene en la resistencia por el efecto Joule; en donde la potencia que se disipa en la resistencia interna se calcula de la siguiente manera:

$$P_{disipada} = R_{interna} * I_{bat}^2 \quad (9.10)$$

A partir de esto se obtiene el siguiente modelo:

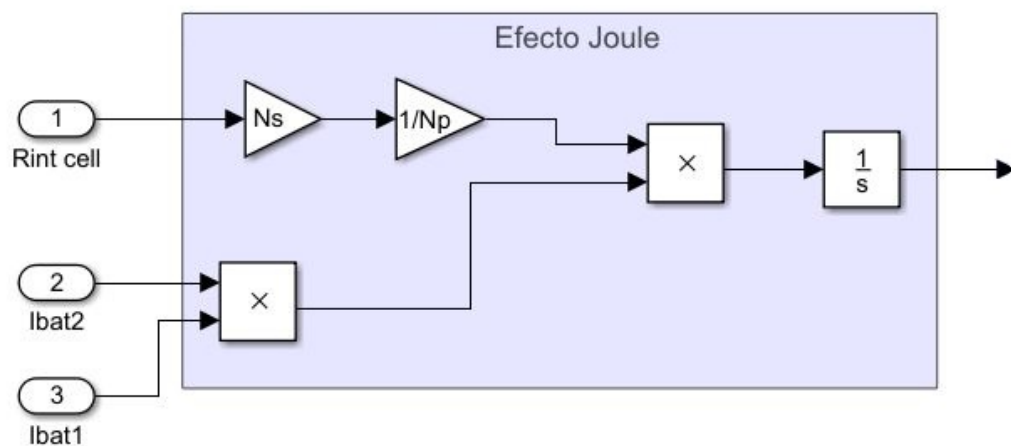


Figura 9.10: Diagrama de bloques de Simulink que modela el efecto Joule en batería.

Siendo I_{bat} la intensidad requerida por la batería, $R_{intcell}$ la resistencia interna de cada celda, que al multiplicarla por N_s (las celdas en serie que están en la batería) y dividirla entre N_p (las celdas en paralelo), representan el valor equivalente

Capítulo 9. Implementaciones realizadas

de la resistencia interna de la batería. Al integrar la potencia disipada, se obtiene el calor generado en la batería por efecto Joule como previamente fue detallado [55].

9.6.2. Transferencia de calor por convección

Como fue estudiado en el capítulo 8, el comportamiento de la batería que representa la transferencia de calor por convección al ambiente, queda determinado bajo la siguiente expresión:

$$Q_{dis} = h * A * (T_2 - T_1) \quad (9.11)$$

Donde particularmente se determinó el valor del coeficiente de transferencia de calor basado en el estudio realizado en [51], el cual fue detallado en el capítulo 8. Por lo que el valor de h es el siguiente:

$$h = 1,1153 \frac{W}{m^2 K} \quad (9.12)$$

Este valor se generaliza dado que el ensayo realizado es para un pack de baterías del tipo Ion-Litio utilizada en vehículos eléctricos.

En la figura 9.11 se muestra el sistema de transferencia de calor por convección implementado, en donde se asume un área de la batería genérico de $A_{bat} = 1,5m^2$, la cuál representa la superficie de la cara inferior de la batería en contacto con el ambiente. Ésto se debe a que se consideró que las caras laterales de la misma tiene un área despreciable y que la cara restante se encuentra aislada del habitáculo.

A su vez, se determina que la resta de temperaturas es entre la temperatura de la batería en cada instante (T_{bataux}) y la temperatura ambiente (T_{amb}). A partir de estos datos y al integrar la ecuación 9.11, se obtiene el calor que la batería transfiere al ambiente. Posteriormente este valor se restará al calor que se genera en la batería por efecto Joule.

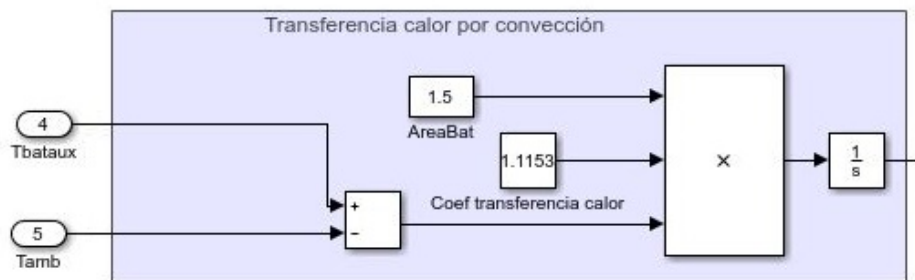


Figura 9.11: Diagrama de bloques de Simulink que modela la transferencia de calor por convección en batería.

9.6.3. Sistema de ventilación forzada

El sistema de ventilación forzada cumple la función de encender la ventilación en el caso que la temperatura de la batería supere los $40^{\circ}C$ y apagarlo si se logra reducir la temperatura a $35^{\circ}C$ como forma de operar dentro de la zona segura (SOA). Para determinar las características del ventilador a utilizar, se tomó como hipótesis que el sistema de ventilación forzada sea capaz de disipar el máximo calor generado en la batería, es decir, bajo el supuesto de mayor exigencia. Es por ello que se determinó el flujo másico máximo de aire (\dot{m}) necesario para disipar el calor generado en la batería, por lo que se parte de la siguiente ecuación [55]:

$$\dot{m} = \frac{P_{generada} - P_{convección}}{C_{paire} * \Delta T} \quad (9.13)$$

En cuanto a la potencia generada por efecto Joule, se asumió que la misma debe ser la más exigente, esto se debe a que el ventilador debe ser capaz de satisfacer el flujo másico máximo. Para ello es necesario conocer el trayecto que posee el mayor valor medio de corriente que circula en la batería. Por lo que se determina que el ciclo de conducción WLTP clase 3, es el que exige la mayor corriente a la batería. Por lo tanto, la máxima potencia generada resulta ser de $P_{generada} = 622W$. Asumiendo un factor de sobre dimensionamiento de 1,2, se llega a que $P_{generada_{max}} = 746,4W$.

Dado el funcionamiento esperado del sistema de ventilación forzada, se considera como peor caso para la transferencia de calor por convección una temperatura de batería de $35^{\circ}C$, tomando como temperatura inicial la temperatura máxima media en Montevideo en verano, siendo la misma de $28,75^{\circ}C$ [56], se obtiene el calor disipado por convección $P_{convección} = 10,5W$. Al igual que en el estudio realizado en [57] se realiza la suposición de que la variación de temperatura del aire forzado a fluir por la batería es $\Delta T = T_{aireout} - T_{airein} = 5^{\circ}C$. Finalmente la capacidad calorífica del aire es conocida y su valor es de $C_{paire} = 1007 \frac{J}{kg^{\circ}C}$. Por lo que se obtiene el valor del flujo másico del aire requerido bajo las condiciones planteadas, las cuales garantizan un funcionamiento de la batería dentro de la zona de operación segura y a su vez que el ventilador sea capaz de abastecer el \dot{m} más exigente [55]. Por lo que se llega a:

$$\dot{m} = 0,1462 \frac{kg}{s} \quad (9.14)$$

Una vez determinado el valor del flujo másico máximo del aire que se le puede llegar a exigir al ventilador del vehículo, se procedió a determinar la potencia requerida por el ventilador a utilizar. Para ello se procedió a determinar el flujo volumétrico de aire que debe ser capaz de abastecer. Por lo que a partir del estudio [55] se realiza la siguiente operación:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_{aire}} = \frac{0,1462 \frac{kg}{s}}{1,16 \frac{kg}{m^3}} = 0,1260 \frac{m^3}{s} = 7560 \frac{l}{min} \quad (9.15)$$

Por lo tanto, una vez establecido el flujo volumétrico necesario para lograr un enfriamiento adecuado en la batería, se decidió utilizar dos módulos ventiladores de la marca "Johnson Electric" específicos para vehículos eléctricos los cuales

Capítulo 9. Implementaciones realizadas

son capaces de forzar un flujo volumétrico de $\dot{V} = 4200 \frac{l}{min}$ cada uno, con una potencia consumida de $P_{ventilador} = 200W$ [58]. A partir de los datos aportados anteriormente se calcula la potencia total consumida por dicho sistema:

$$P_{ventilador} = 400W \quad (9.16)$$

Finalmente, se determinó que cada vez que el sistema de ventilación se encuentre en funcionamiento, la potencia consumida por él, será sumada a la potencia requerida por la batería. Esto genera que la energía consumida por el vehículo aumente al trabajar bajo condiciones que requieran de la activación del sistema de ventilación forzada. Cabe destacar, que dicho sistema se activará siempre y cuando la temperatura supere a los $40^\circ C$.

En la figura 9.12 se representa la implementación realizada en Simulink, la cuál corresponde al sistema de ventilación forzada, junto al consumo del ventilador a utilizar. A su vez, se dispone de un diagrama de estados, el cual cumple la función de encender el ventilador en el caso que la temperatura de la batería (T_{bataux}) supere los $40^\circ C$ y apagarlo si se logra reducir la temperatura a $35^\circ C$.

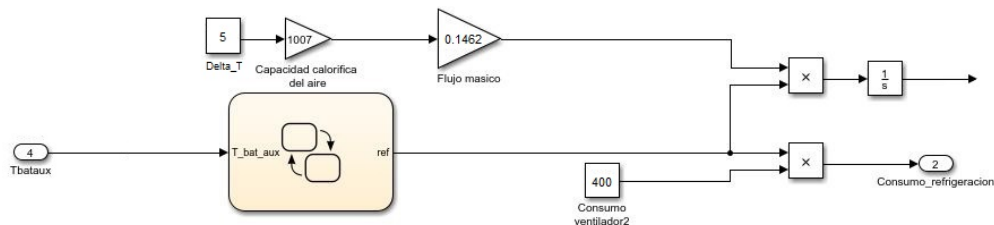


Figura 9.12: Diagrama de bloques implementado en Simulink para la refrigeración forzada en batería.

9.6.4. Modelo térmico de la batería

Una vez establecidos los factores que se consideran al diseñar un modelo correspondiente a la variación de temperatura en la batería, se procede implementar un modelo térmico que reúna las características desarrolladas anteriormente. Por lo tanto, en la figura 9.13 se encuentra el resultado de dicha implementación.

9.6. Inclusión del sistema de control de la batería - BMS

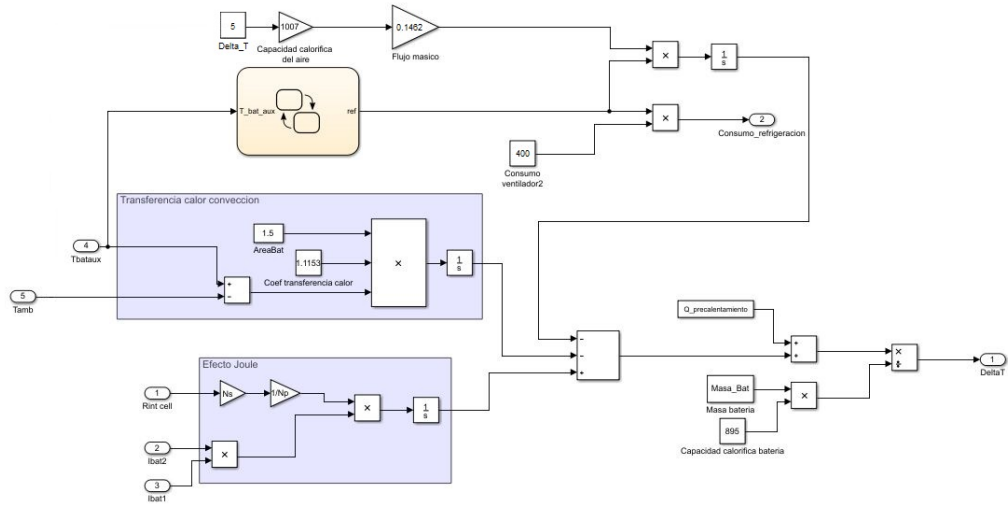


Figura 9.13: Implementación de bloques en Simulink para modelo térmico en la batería.

Como se puede apreciar en la imagen, el calor resultante en la batería se plantea de la siguiente manera:

$$Q_{Tot} = Q_{Rint} - Q_{conv} - Q_{vent} \quad (9.17)$$

Siendo Q_{Rint} el calor generado en la batería como consecuencia del efecto joule de la resistencia interna, Q_{conv} el calor liberado de la batería por convección y por último Q_{vent} el calor liberado de la batería cuando se recurre a una ventilación forzada. Una vez que se obtiene el calor total en la batería, se procede a determinar cuál es la diferencia de temperatura que se genera en la batería en cada instante, para ello se parte de la siguiente ecuación:

$$\Delta T = \frac{Q_{Tot}}{C_p * M_{bat}} \quad (9.18)$$

Donde C_p corresponde a la capacidad calorífica de la batería, que tiene el valor de $C_p = 895 \frac{J}{kg * ^\circ C}$ [55]. La misma se traduce en la cantidad de calor que se requiere para aumentar un grado Celsius 1 kg de la batería. A su vez M_{bat} es la masa de la batería en kg, estando dicho valor precargado en el sistema para cada vehículo.

9.6.5. Pre calentamiento

Como fue expuesto previamente (Véase capítulo 8), el BMS se encarga de monitorear la temperatura de la batería cuando el vehículo está en funcionamiento. A su vez, otro factor que toma en cuenta el sistema, es que el vehículo no puede trabajar bajo condiciones de temperaturas inferiores a los $0^\circ C$. En el caso que esto llegue a suceder, el sistema activará el modo de pre calentamiento para la batería. En la figura 9.13 se observa el calor asociado a este modo, el mismo se define como $Q_{pre calentamiento}$. Para calcular el calor correspondiente al pre calentamiento de la

Capítulo 9. Implementaciones realizadas

batería, se considera una eficiencia del 75 % [59]. Por lo que se realiza el siguiente cálculo:

$$Q_{precalentamiento} = \frac{C_p * \Delta T * M_{bat}}{0,75} = \frac{895 * (0^{\circ}C - T_{amb}) * M_{bat}}{0,75} \quad (9.19)$$

Como se puede observar, cuanto menor sea la temperatura del ambiente, mayor será el calor necesario para calentar la batería. Esto implica que se utilice energía de la batería para lograr calentarla y de esta forma funcionar dentro de la SOA.

9.6.6. Variación de temperatura en la batería

Una vez diseñado el modelo térmico de la batería, se implementa un sistema realimentado. El mismo se utiliza para tener conocimiento en todo momento de la temperatura actual de la batería (T_{bat_aux}). Como se puede apreciar en la figura 9.14, la suma de la variación de temperatura calculada (ΔT) y la temperatura que tiene la batería inicialmente (T_{bat}), se realiza en todo instante y da como resultado T_{bat_aux} . A su vez, ésta se utiliza como una de las variables de entrada del bloque “Variación temperatura”.

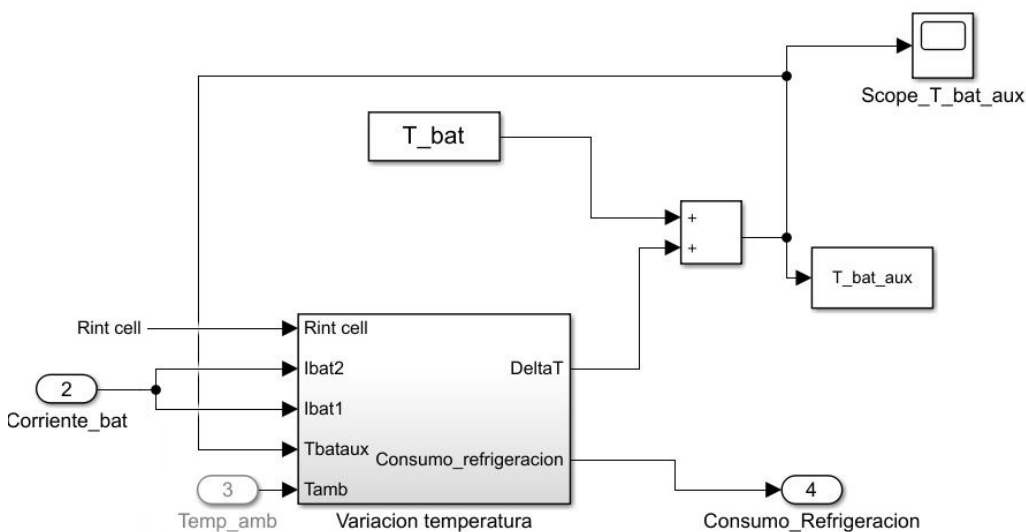


Figura 9.14: Diagrama de bloques de Simulink para la variación de temperatura de la batería.

Para finalizar, se implementó la opción para que el usuario pueda visualizar la gráfica correspondiente a la variación de temperatura en la batería, para ello se dispone de un “Scope_T_bat_aux” el cual se encarga de mostrar el comportamiento de dicha temperatura. Esta opción se encuentra dentro del listado de visualizaciones posibles que se pueden mostrar al realizar un ciclo de conducción.

9.6. Inclusión del sistema de control de la batería - BMS

9.6.7. Limitantes para la corriente máxima de la batería

Como fue visto en el capítulo 8, la curva correspondiente al factor de descarga de la batería en función de la temperatura, muestra que en situaciones que la temperatura de la batería supere los 40°C , se deberá limitar la corriente que circula por la misma, es decir, que a medida que la temperatura se vea incrementada, menor será el valor máximo de la corriente permitida a extraer de la batería. Por otro lado, en el caso que la temperatura supere los 60°C , el sistema de control BMS deberá detener automáticamente el funcionamiento del vehículo, ya que como previamente fue detallado, trabajar a altas temperaturas puede generar graves consecuencias en la batería. Por lo tanto, para la limitante a la corriente por temperatura, lo que se realiza es imponer la curva de la figura 9.15.

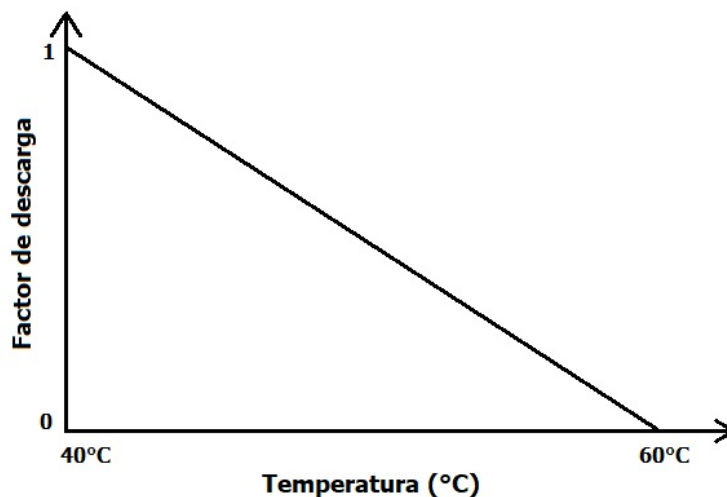


Figura 9.15: Factor de limitante máxima de la corriente de descarga para temperaturas fuera de la SOA

Otro factor que se tiene en cuenta para limitar la corriente máxima de la batería, es imponer que la corriente máxima de pico de la batería sea 3 veces la capacidad nominal de la batería ($3 * \text{Rated}_{capacity}$) [60]. Anteriormente no se contaba con esta limitante, por lo que teóricamente el vehículo le podía solicitar a la batería un valor de corriente de pico excesivo capaz de dañar a la misma. Ambas implementaciones se tuvieron en cuenta a la hora de limitar la corriente máxima que se le puede solicitar a la batería. Estas implementaciones se encuentran en la siguiente figura.

Capítulo 9. Implementaciones realizadas

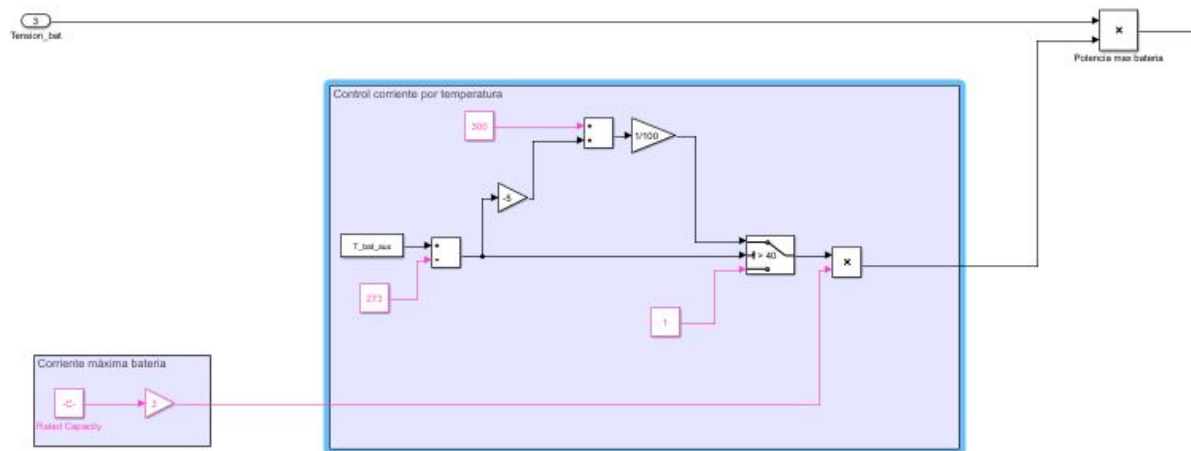


Figura 9.16: Limitación de la Potencia máxima de la batería por corriente y temperatura.

Como se aprecia en la figura 9.16, se dispone de un bloque selector, el cual es el encargado de preguntar si la temperatura supera los $40^{\circ}C$. En caso de que esto se cumpla, la corriente se multiplicará por un factor de descarga (ver figura 9.15), con la finalidad de reducir la corriente por la batería y así disminuir la temperatura que se genera en la batería por efecto Joule.

Capítulo 10

Ensayo de un vehículo eléctrico en ruta

El objetivo de este ensayo es conocer el comportamiento del vehículo eléctrico en ruta, así como también recabar datos de interés para una posterior validación de las implementaciones realizadas. Para ello se realizó un ciclo de conducción en ruta con un vehículo eléctrico real, registrándose el perfil de velocidades de dicho ciclo, el consumo del vehículo en el mismo, el estado de carga final (SOC) y la energía regenerada en el trayecto.

En el presente capítulo se desarrollará con detalle la metodología de ensayo, así como también se pondrán en escena los datos recabados. El análisis correspondiente a dichos resultados se exponen en el capítulo 11.

10.1. Ensayo realizado:

El trayecto en ruta realizado se logró gracias a la colaboración por parte de la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE), en donde se puso a nuestra disposición un vehículo eléctrico de su flota y un chofer habilitado para la conducción del mismo.

10.1.1. Características del vehículo utilizado

Los principales parámetros del vehículo que se utilizó en la prueba son [61]:

- **Marca:** Renault
- **Modelo:** ZOE
- **Año:** 2015
- **Kilómetros:** 24545 km
- **Masa en vacío:** 1428 kg
- **Masa de pasajeros:** 250 kg
- **Velocidad máxima:** 135 $\frac{km}{h}$

Capítulo 10. Ensayo de un vehículo eléctrico en ruta

- **Tensión nominal de batería:** 360 V
- **Potencia nominal del motor:** 65 kW
- **Potencia máxima de carga de la batería:** 43 kW
- **Energía útil de almacenamiento:** 22 kWh
- **Torque máximo del motor:** 220 Nm

10.1.2. Condiciones iniciales del ensayo

Las condiciones iniciales del vehículo al comenzar el ensayo fueron las siguientes:

- **SOC:** 100 %
- **Masa de los pasajeros:** 250 kg
- **Temperatura ambiente:** 10°C
- **Hora de inicio:** 11:24 AM

10.1.3. Detalles del recorrido

El trayecto de ruta correspondiente se visualiza en la figura 10.1. El mismo tiene como punto de partida el palacio de la luz y destino la central térmica de UTE, ubicada en punta del tigre, se realiza en ambos sentidos. Es un trayecto que incluye pendientes pronunciadas y a su vez un perfil de altas velocidades.

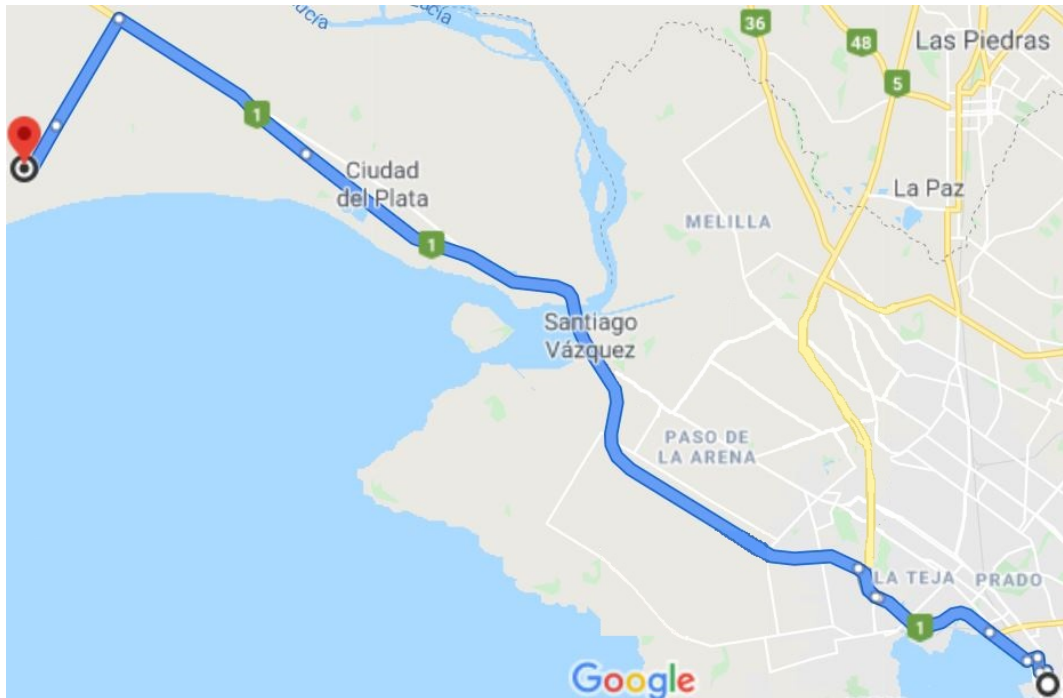


Figura 10.1: Circuito en ruta, inicio Palacio de la luz - fin Central Térmica, punta del tigre.

La finalidad del trayecto elegido es el estudio del comportamiento del vehículo eléctrico en ruta y el relevamiento del mismo para su posterior inclusión en el software. La distancia del mismo se eligió con el objetivo de efectuar un consumo casi total de la energía máxima disponible de la batería para así determinar parámetros como capacidad y SOH.

10.2. Datos a Registrar

El Renault ZOE utilizado cuenta con una computadora de a bordo, la cual registra datos del desempeño del vehículo en el recorrido realizado. Los datos obtenidos de la misma son los siguientes:

- Distancia total (km)
- Velocidad media ($\frac{km}{h}$)
- Consumo medio ($\frac{kWh}{100km}$)

Capítulo 10. Ensayo de un vehículo eléctrico en ruta

- Consumo total(kWh)
- Visualización de la Potencia consumida en función del tiempo.
- Visualización de la Energía utilizada en función del tiempo.
- Energía recuperada (kWh)
- Energía consumida por SSAA (kWh)

A su vez, para el registro del perfil de velocidades en función del tiempo se utilizaron las aplicaciones *SpeedLogger* [62] y *SpeedBot* [63]. Las cuales registra instante a instante la velocidad del vehículo utilizando la localización GPS del teléfono.

Cabe destacar que previamente a la utilización de las mismas en la prueba, se verificó que las aplicaciones midieran de forma correcta la velocidad, el tiempo y la ubicación.

10.3. Resultados del ensayo

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en el ensayo. Se muestran los datos obtenidos por la computadora a bordo del vehículo y los extraídos del SAVE.

10.3.1. Datos obtenidos de la computadora a bordo del vehículo

Previo al comienzo del ensayo se procede a reiniciar los parámetros de la computadora a bordo con la finalidad de recabar exclusivamente los datos del circuito a realizar. A continuación se observan los datos registrados tanto para el trayecto de ida como para el trayecto completo (ida y vuelta).

Trayecto de ida:

- Distancia total: 44.5 km
- Velocidad media: $62.6 \frac{km}{h}$
- Consumo medio: $16 \frac{kWh}{100km}$
- Consumo total: 7.0 kWh
- Energía recuperada por frenado regenerativo: 0.8 kWh
- Energía consumida por SSAA: 0 kWh

Trayecto ida y vuelta:

- Distancia total: 87.9 km

10.3. Resultados del ensayo

- Velocidad media: $63.4 \frac{km}{h}$
- Consumo medio: $16.1 \frac{kWh}{100km}$
- Consumo total: 14.2 kWh
- Energía recuperada por frenado regenerativo: 1.7 kWh
- Energía consumida por SSAA: 0.1 kWh

Cabe destacar que la energía utilizada correspondiente a los SSAA es nula para el tramo de ida debido a que el único servicio auxiliar que se encendió fueron las luces cortas, que poseen un consumo casi despreciable por ser de tecnología LED. Para el trayecto de vuelta se decidió encender la calefacción del habitáculo, registrando la computadora de a bordo un consumo y se recabó que la energía correspondiente a los servicios auxiliares fue equivalente a 0.2 kWh.

Una vez finalizado el trayecto completo, al conectar el vehículo al cargador SAVE (Sistema de Alimentación de Vehículo Eléctrico) en la pantalla a bordo del vehículo, se observó que el estado de carga final (SOC) era de 25 %.

10.3.2. Datos extraídos del SAVE

Una vez finalizado el trayecto se realizó la recarga del vehículo en el centro de carga ubicado en Palacio de la Luz (General Aguilar esquina Paraguay). La potencia que puede suministrar el SAVE utilizado para la carga es de 22 kW. Dicha potencia es menor que la potencia máxima del cargador de la batería del vehículo, por lo tanto la misma fue la potencia de carga a la que se sometió la batería.

Una vez completada la carga, el medidor de energía detalló que se requirieron de 15.7 kWh. Este dato fue brindado por UTE, el cual fue obtenido de una aplicación que se ha desarrollado para uso de la propia de la institución. Véase figura 10.2.

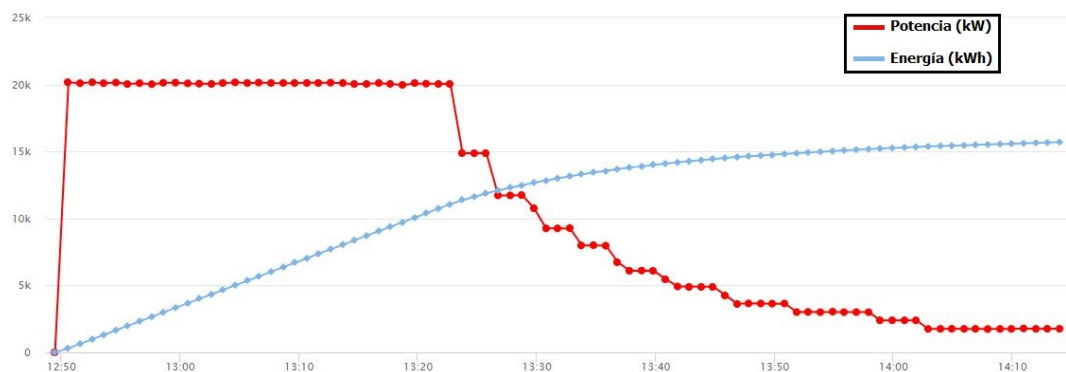


Figura 10.2: Curva de carga Renault ZOE.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 11

Validación del modelo desarrollado

En el presente capítulo se lleva a cabo una evaluación de las implementaciones realizadas. La misma se realiza mediante la comparación entre resultados de simulaciones de nuestro software y datos reales, siendo estos últimos obtenidos a partir del ensayo realizado en ruta con un vehículo eléctrico expuesto en el capítulo 10 y datos publicados por terceros.

Cabe destacar que ciertos parámetros tales como la resistencia interna de la batería y el BMS no pueden evaluarse por completo. Esto se debe a que los fabricantes no hacen públicos los resultados de estos estudios y a su vez se escapa de nuestro alcance la medición de la resistencia interna y la temperatura de una batería montada en un vehículo en funcionamiento.

11.1. Ensayo en ruta

En esta sección se comparan los datos recabados en el ensayo realizado en ruta con los obtenidos mediante la simulación para el mismo ciclo y vehículo.

11.1.1. Análisis de resultados

Si se analizan los datos recabados se observa que la energía que suministró el servidor SAVE para realizar la recarga completa de la batería (15.7 kWh) fue superior que la energía consumida de acuerdo a lo indicado por la computadora a bordo del vehículo. A los efectos del análisis de resultados se considerará como energía consumida por el vehículo eléctrico en este trayecto al dato obtenido del SAVE, siendo éste el más confiable y certero, ya que al ser un medidor para facturación posee bajo porcentaje de error.

Tomando en cuenta que el cargador del automóvil tiene una eficiencia del 95 % [64] debido a pérdidas por disipación de calor, tanto en el cable como en el circuito interno de potencia del cargador, se obtiene que la energía que se utilizó para recargar la batería por completo fue de 14.915 kWh (0.95×15.7 kWh). Al realizar una carga desde el 25 % al 100 % del SOC, es decir un 75 %, resulta que la capacidad actual de la batería es de $\frac{14,915 \text{ kWh}}{0,75} = 19.88$ kWh.

Capítulo 11. Validación del modelo desarrollado

A partir de este dato, se estima el SOH del vehículo:

$$SOH = \frac{19,88kWh}{22kWh} = 90,39\% \quad (11.1)$$

En la figura 10.2 además de observarse el dato de la energía necesaria para recargar la batería, se puede apreciar el tiempo que tardó este proceso, que fue de 1 hora y 25 minutos. A su vez como fue visto en el capítulo 10 la carga se realiza en un SAVE de 22 kWh y de acuerdo a lo citado en el capítulo 5, la misma se efectúa a una corriente de 61.11 A ($\frac{22kW}{360V}$), es decir que la tasa de carga hasta llegar aproximadamente al 80% es de 1C.

Luego de alcanzado el 80% del SOC, la velocidad de carga se enlentece, efectuándose a un C_{rate} menor. Este efecto se puede apreciar mejor en la figura 10.2, ya que la potencia de carga en ese momento comienza a disminuir. Según los datos brindados por UTE, la energía en ese momento es equivalente a 11.7 kWh, por lo tanto mediante la siguiente ecuación se verifica que el estado de carga de la batería es cercano al 80%.

$$E_{inicial} = 0,25 * \left(\frac{15,7}{0,75}\right)kWh = 0,25 * 20,93kWh = 5,23kWh \quad (11.2)$$

$$E_{carga} = 5,23kWh + 11,7kWh = 16,93kWh \quad (11.3)$$

$$E_{carga} = \frac{16,93kWh}{20,93kWh} = 80,88\% E_{bat} \quad (11.4)$$

Finalmente, se incluyó en el software el trayecto del ensayo, para así poder efectuar una comparación entre las simulaciones correspondientes y los resultados obtenidos en la prueba, de forma tal de validar algunas de las implementaciones realizadas.

Una vez recabados los datos correspondientes al trayecto, éstos se exportaron en formato excel a MATLAB en donde, además de velocidad y tiempo, se ingresaron las diferentes pendientes que se dieron en el recorrido. Para ello se utilizó la herramienta de *Google Earth*, con la cual se determinó la inclinación del terreno (en grados) por tramos en función de la altura. Se dividió el trayecto en segmentos y midiendo la distancia recorrida entre dos puntos y la diferencia de alturas entre ellos, a partir de relaciones trigonométricas, se obtuvo el perfil de inclinaciones.

11.1.2. Simulación del ciclo de ruta

En el presente apartado, se expondrán los resultados mostrados por el software al realizar la simulación del ciclo correspondiente.

Se consideró únicamente la implementación del trayecto de ida dada la similitud que existe con el de la vuelta. Para ello, una vez cargados los parámetros indicados en el apartado anterior, se selecciona en el software el ciclo de conducción de ruta y se muestra el perfil de velocidades del trayecto:

Capítulo 11. Validación del modelo desarrollado

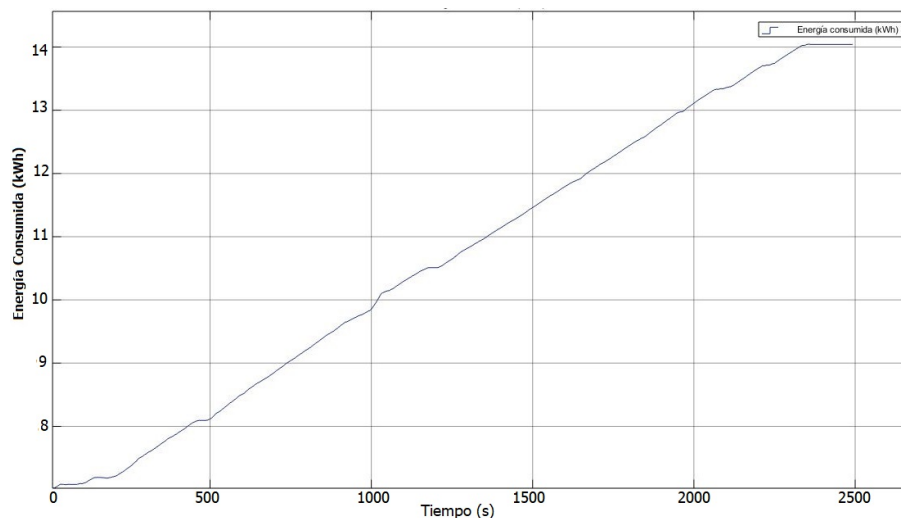


Figura 11.2: Energía consumida en el trayecto completo de ruta.

Como se puede apreciar, la energía que se consume en el trayecto es de:

$$E_{consumida} = 14,04kWh \quad (11.5)$$

Este resultado de la simulación se considera válido, ya que para ese recorrido según el SAVE el mismo fue de $E_{consumida} = 14,915kWh$. Por lo que el error relativo que se obtiene al comparar el resultado de la simulación realizada y el de campo de prueba es de 5,87 %.

En cuanto a la energía que se regenera, el resultado de la simulación es el siguiente:

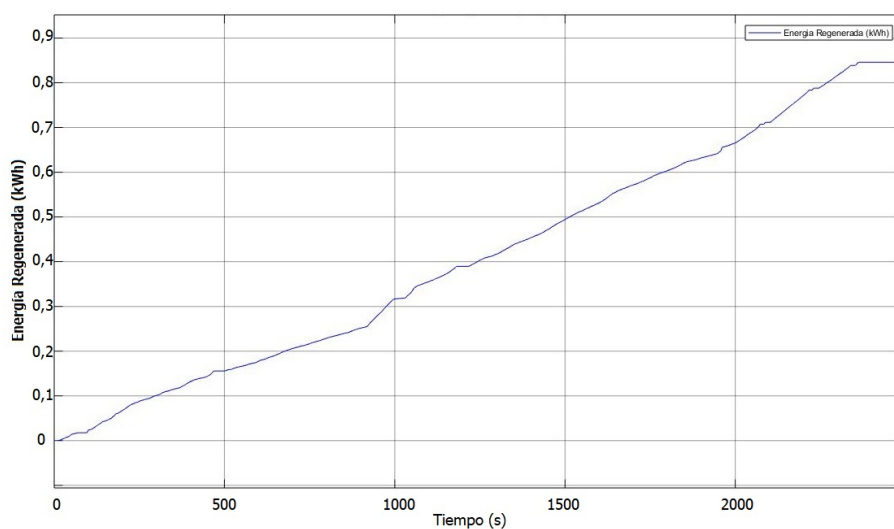


Figura 11.3: Energía regenerada en el trayecto de ida en ruta.

En donde la energía que se recupera es de:

$$E_{regenerada} = 0,845kWh \quad (11.6)$$

En esta oportunidad, el resultado tiene una pequeña diferencia con el obtenido en el campo de prueba, donde el mismo fue de $E_{regenerada} = 0,8kWh$, el cual se observó de la computadora a bordo. Esta diferencia corresponde a un error relativo de 5.6 % ($\frac{0,845kWh - 0,8kWh}{0,8kWh} \times 100$), siendo el mismo un resultado que no se aleja del esperado.

Esta desemejanza se justifica debido a que la energía regenerada por el frenado, se ajustó para un ciclo de conducción WLTP clase 3 (ver capítulo 9), por lo que el perfil de velocidades de este ciclo no representa exactamente el comportamiento para un trayecto real. De igual modo, se considera que el resultado reflejado por el programa es válido dado que el error relativo es chico y a su vez la pantalla de la computadora a bordo del vehículo tiene su propia incertidumbre.

Si se realiza la simulación en el software del ciclo de conducción (Montevideo completo), el cual fue implementado anteriormente. Al observar la distancia del circuito (42,3 km), se denota que la misma es similar a la del trayecto de ida en ruta. Por lo que al simular dicho trayecto con el Renault ZOE 22 kWh utilizado en la prueba, se observa cuál es la energía que se regenera, siendo la misma 1,797 kWh. Esto se realiza con la finalidad de compararla con la energía que se regenera en el circuito de ruta. Por lo que se observa que para el trayecto urbano se regenera un 19.7 % de la energía utilizada, mientras que para el circuito de ruta se regenera un 10.2 % ($\frac{E_{regenerada}}{E_{regenerada} + E_{consumida}}$).

Esto verifica que la energía que se regenera en un circuito urbano es mayor a la que se regenera en un trayecto de ruta. Esto es debido a que en trayectos rurales se requiere de una velocidad alta y constante en el tiempo, sin la necesidad de frenar reiteradas veces, por lo tanto en estos trayectos se termina regenerando menos.

Por otro lado, para el estado de carga (SOC), como no se incluyó al software el trayecto de vuelta en ruta y dada la similitud de ambos, se procede a unir dos ciclos de conducción correspondientes al trayecto de ida. El resultado del mismo se puede ver en la figura 11.4. En donde el SOC inicial que se observa es de 62.4 % de carga, esto es debido a que previamente fue simulado el trayecto de ida y al anidar ciclos, se comienza desde el estado de carga final del trayecto de ida.

Capítulo 11. Validación del modelo desarrollado

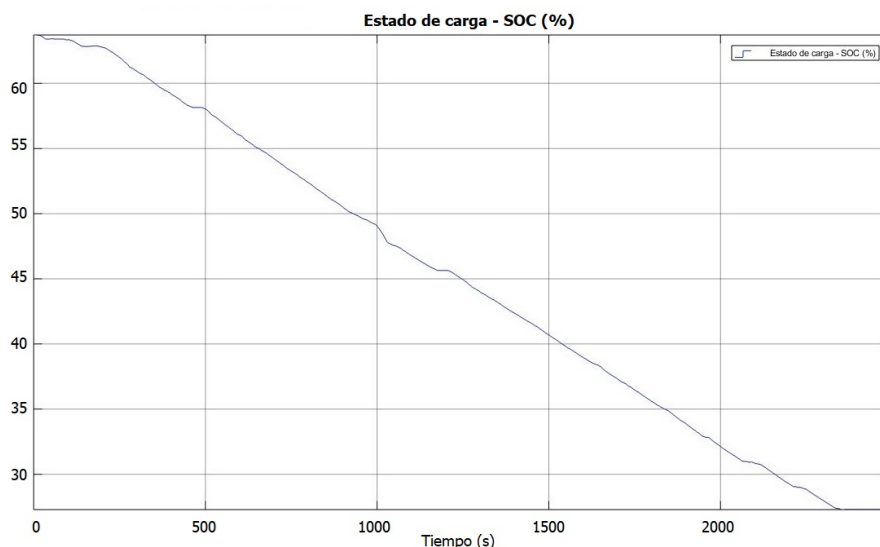


Figura 11.4: SOC al finalizar el trayecto completo en ruta.

Por lo tanto, el resultado final del estado de carga es el siguiente:

$$SOC_{final} = 27,2\% \quad (11.7)$$

Esta es una aproximación que se considera certera, ya que en la prueba real, el estado de carga final indicado en el vehículo era de 25%. Esta diferencia se justifica con que el ciclo simulado, como anteriormente fue explicado, es la unión de dos veces el mismo trayecto de ida y no el ciclo completo.

Por otro lado, este resultado sirve para validar la implementación correspondiente al estado de salud de la batería SOH, ya que según lo simulado se puede calcular el valor del mismo de la siguiente manera:

$$SOH = \frac{\frac{14,04 \text{ kWh}}{(100-27,2)} \times 100}{22 \text{ kWh}} = 87,68\% \quad (11.8)$$

Por lo tanto, si se compara con el resultado esperado de 90.39%, el cual se puede ver en la ecuación 11.1, el error relativo que resulta es de 3%, el cual claramente es un resultado coherente como para validar la implementación realizada.

Finalmente se procede a mostrar el estado de carga final si se considera que el vehículo está nuevo, en este caso como se observa en la figura 11.5, el valor final del SOC será:

$$SOC = 36,58\% \quad (11.9)$$

11.2. Datos aportados por terceros

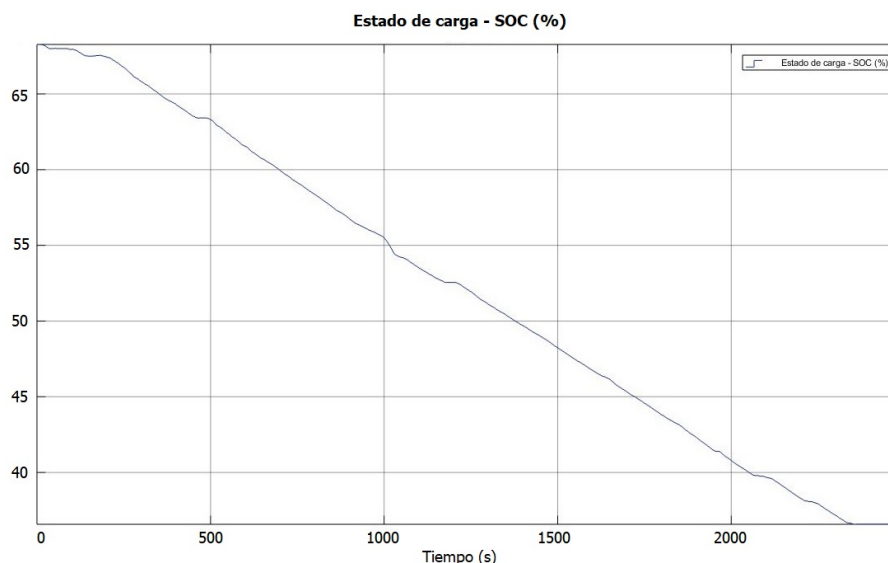


Figura 11.5: SOC (0 km) al finalizar el trayecto completo en ruta.

Como se observa, el estado de carga es claramente superior al del vehículo con los parámetros cargados de año y ciclos de batería, en donde se verifica que el consumo de energía empeora con el tiempo y los km de conducción, es decir que estos factores tienen una incidencia directa en el estado de salud de la batería SOH como fue visto anteriormente.

A modo de resumen se puede concluir que con la inclusión al software del trayecto de ruta realizado con un vehículo eléctrico (Renault ZOE 22 kWh), se validan las implementaciones realizadas en lo que respecta al frenado regenerativo y el estado de salud de la batería. En la siguiente tabla se aprecian los resultados obtenidos:

	Medida en ensayo	Medida en Software	Error Relativo
Energía Consumida	14.915 kWh	14.04 kWh	5.87 %
Energía Regenerada	0.8 kWh	0.845 kWh	5.6 %
SOH	90.39 %	87.68 %	3 %

Tabla 11.1: Comparación de los resultados obtenidos con el Renault ZOE 22 kWh

11.2. Datos aportados por terceros

En esta sección se aportarán datos brindados por fabricantes de los vehículos o por terceros que realizaron ensayos que validen nuestras implementaciones

Capítulo 11. Validación del modelo desarrollado

realizadas.

11.2.1. Autonomías en ciclos WLTP y NEDC

En este apartado se mostrarán los resultados que surgen al realizar una simulación de los ciclos de homologación para los vehículos eléctricos cargados en el software. La finalidad de esto es mostrar que los vehículos fueron ajustados con respecto a los ciclos de conducción NEDC y WLTP.

Por lo tanto en la siguiente tabla se presentarán los resultados correspondientes a estas simulaciones:

Vehículo	Ciclo de conducción	Autonomía del fabricante (km)	Autonomía del Software (km)	Error Relativo
Renault Kangoo ZE	NEDC	170 km	185 km	8.8 %
	WLTP clase 3	133.1 km *	154 km	15.7 %
Renault ZOE	NEDC	403 km	365 km	9.4 %
	WLTP clase 3	300 km	310 km	3.3 %
Nissan Leaf	NEDC	199 km	185 km	7 %
	WLTP clase 3	155.8 km *	154 km	1.1 %
BYD E6	NEDC	300 km	270 km	10 %
	WLTP clase 3	234.9 km *	256 km	8.9 %
Volkswagen E-Up!	NEDC	160 km	167 km	4.3 %
	WLTP clase 3	134 km	123 km	8.2 %
Renault Kangoo ZE 33 kWh	NEDC	270 km	300 km	11.1 %
	WLTP clase 3	230 km	250 km	8.7 %
Renault ZOE 22 kWh	NEDC	210 km	196 km	6.6 %
	WLTP clase 3	164.4 km *	156 km	5.1 %
BYD YUAN	NEDC	400 km	403 km	0.7 %
	WLTP clase 3	313 km	319 km	1.9 %

Tabla 11.2: Tabla comparativa de autonomía de fábrica y autonomía del software para los distintos modelos de vehículos cargados en el software.

Para el caso de algunos vehículos eléctricos, se observa que la autonomía brindada por el fabricante es únicamente la del ciclo de homologación NEDC. Es por ello que están identificadas con un asterisco algunas autonomías correspondientes al ciclo WLTP clase 3. En estos casos se estima su valor multiplicando la autonomía NEDC por 0,783 (esto será desarrollado en el apéndice A).

Esta ausencia del dato brindado por el fabricante se debe a que el ciclo WLTP fue declarado obligatorio a partir del primero de Septiembre del 2018 para todos los vehículos nuevos. Por lo tanto, para el caso en que los vehículos son anteriores a la fecha mencionada, no están obligados a testear bajo el ciclo WLTP.

Al evaluar en ambos ciclos de conducción (NEDC y WLTP), si se observa el error relativo que se tiene entre las autonomías teórica y simulada, se denota que en el caso que las autonomías son estimadas (las cuales están marcadas con *), tendrán un error relativo mayor. Tales son los casos del Renault Kangoo, donde

11.2. Datos aportados por terceros

el error relativo es de 15,7% y del BYD E6 donde el error es de 8,9%. Esto justamente se da porque se está utilizando una aproximación para comparar, por lo que se incrementa el error.

Para el resto de los casos en que se tienen ambas autonomías brindadas por el fabricante, lo que se realizó fue ajustarlas de manera que las simuladas resulten lo más cercanas posible a la del fabricante para ambos casos. Hubiese sido lo ideal, poder ensayar todos los vehículos para realizar un ajuste real en cada caso, pero únicamente se cuenta con estos datos para la Kangoo y el Zoe 22, dado que derivaron de pruebas realizadas.

11.2.2. Vida Útil de la batería

En esta sub-sección se contrastará los resultados obtenidos de la simulación de la vida útil de la batería de distintos modelos de VE a partir del algoritmo del SOH contra datos de las garantías que ofrecen los fabricantes para las baterías. Dicha cobertura nos puede dar una buena medida de la confianza que los fabricantes tienen en sus sistemas. Es claro que cuanto más robusta sea la batería, más tranquilo estará el comprador, al igual que el vendedor.

El método de garantía ofrecido comúnmente en la actualidad por parte de los fabricantes cumple que si la capacidad de la batería se torna menor a un límite antes de determinado tiempo o una cantidad de km recorridos por el VE, el fabricante se compromete a reemplazar el pack de baterías por uno nuevo. Dichos valores son elegidos por los fabricantes teniendo en cuenta márgenes de seguridad, por lo que los valores estimados de las simulaciones serán razonables si son mayores o próximos a los límites impuestos por la garantía. De esta manera se espera que se alcancen los límites de km recorridos y años del vehículo a la vez, o en el caso de que el fabricante tome un menor riesgo a la hora de ofrecer la garantía, la simulación arrojará valores más optimistas.

Se eligieron dos modalidades de simulación para analizar los resultados del SOH. La primera fue calcular la cantidad de km que se deberán recorrer para llegar al límite del SOH y de años impuestos por la garantía del VE al mismo tiempo. La segunda forma es calcular cuántos años se necesitarán para que se puedan recorrer los km que coincidan con un valor del 80% del SOH en los años que la garantía está vigente. El ciclo elegido para estas pruebas fue el WLTP clase 3, dado que éste posee un perfil de velocidades que simula un uso mixto del automóvil. Para las simulaciones se tomó la carga estándar de 7,4 kW dado que es la recomendada por los fabricantes.

En el siguiente cuadro se expondrán los datos de interés utilizados para la validación de ésta herramienta [65] [66]:

Capítulo 11. Validación del modelo desarrollado

Vehículo	Garantía en años	Garantía en km	Límite del SOH impuesto en la garantía	Ciclo simulado	Simulación de años según límite de km	Simulación de km según límite de años
Renault Zoe 41 kWh	8	160.000	75 %	WLTP clase 3	10 años y 4 meses	228.762 km
Renault Kangoo 33 kWh	5	100.000	80 %	WLTP clase 3	8 años y 5 meses	179.679 km

Tabla 11.3: Comparativas de datos simulados con los límites impuestos por la garantía para la validación del cálculo del SOH.

Los resultados reflejados en la tabla 11.3 muestran que para el Renault Zoe de 41 kWh, la cantidad de años en que el SOH llega al 75 % recorriendo 160.000 km es de 10 años y 4 meses (29 % más que el asegurado por el fabricante). Para el caso de que el vehículo llegue al 75 % de su SOH en la misma cantidad de años estipulada por la garantía, se deben de recorrer 228.762 km (43 % más que el asegurado por el fabricante).

Para el Renault Kangoo 33 kWh las cifras de las simulaciones dan una estimación más optimista de la vida útil de la batería, es decir que el fabricante toma un margen de seguridad mayor a su favor. Para este vehículo la cantidad de años en que el SOH llega al 80 % recorriendo 100.000 km es de 8 años y 5 meses (68 % más que el asegurado por el fabricante). Para el caso de que el vehículo llegue al 80 % de su SOH en la misma cantidad de años estipulada por la garantía, se deben de recorrer 179.679 km (80 % más que el asegurado por el fabricante).

Para ambos vehículos se toma como exitosa la estimación de su vida útil comparada con los límites impuestos en las garantías, dado que se alcanzan el valor límite del SOH para una mayor cantidad de kilómetros y años de las que aseguran los fabricantes.

11.2.3. Vehículo genérico

En esta sección se validará la implementación del vehículo genérico. La misma se realizará escogiendo el vehículo genérico en el software e ingresando especificaciones técnicas de distintos vehículos eléctricos del mercado y simulando los mismos en un ciclo WLTP y NEDC. Con los datos arrojados por las simulaciones se realizará una comparación con los datos aportados por los fabricantes en términos de sus autonomías.

Los vehículos a utilizar con sus especificaciones son los que siguen:

11.2. Datos aportados por terceros

Vehículo	BMW i3 [67] [68]	BYD T3 [69] [70]
Tamaño de rueda	155/70 R19	195/60 R16
Peso del vehículo (kg)	1270	1700
Pot. máxima del motor (kW)	125	70
Torque máximo del motor (Nm)	250	180
Voltaje de la batería (V)	352	438
Capacidad de la batería (kWh)	42.2	50.3
Tipo de química de la batería	LMO	NMC
Tipo de vehículo	Suv	Utilitario
Autonomía dada por el fabricante (WLTP/NEDC)	310km / 359km	- / 300km

Tabla 11.4: Características de los vehículos a estudio para validar la implementación del vehículo genérico.

Autonomías en ciclos WLTP y NEDC

De la misma manera que fue realizado en 11.2.1, en esta sección se realizará una comparación entre las autonomías de diversos vehículos del mercado brindadas por sus fabricantes y las autonomías arrojadas por las simulaciones de los mismos en el software. Dichas simulaciones se realizan para los ciclos WLTP y NEDC y se muestran a continuación.

Vehículo	Ciclo de conducción	Autonomía del fabricante (km)	Autonomía del software (km)	Error relativo (%)
BMW i3	NEDC	359	406.37	13.19
	WLTP Clase 3	310	260.57	15.95
BYD T3	NEDC	300	351.07	17.04
	WLTP Clase 3	234.90*	275.87	17.44

Tabla 11.5: Comparativa entre autonomías de fabricantes y autonomías obtenidas a partir del software

* Valor convertido a partir de la autonomía en ciclo NEDC. Véase B

Dados los valores de las simulaciones obtenidas, junto con los errores relativos para cada vehículo en el ciclo correspondiente, se puede ver que los mismos presentan un error relativo mayor al 10% esperado. Esta desviación en el resultado se atribuye a la gran cantidad de aproximaciones que realiza el software al crear el modelo del vehículo genérico (Véase 9.4). Gran parte de ellas se deben a los parámetros solicitados al usuario, los cuales sólo contemplan las características principales del vehículo de modo de no incurrir en parámetros muy específicos y de difícil acceso, manteniendo de esta forma la simpleza de la herramienta.

Observado lo anterior y en vista de que el error relativo se encuentra en un entorno del 15% se consideran como válidos los resultados obtenidos pues permite al usuario visualizar a grandes rasgos una aproximación al comportamiento de un vehículo en específico.

11.2.4. Trayecto Dinámico

Para la validación de esta funcionalidad se comparó los resultados de las simulaciones de distintos vehículos para los tramos del trayecto de Montevideo previamente cargados contra los obtenidos con la funcionalidad *Trayecto Dinámico* para los mismos recorridos. Dado que ésta modalidad de ciclo traza el trayecto más corto entre dos puntos seleccionados, y los ciclos de conducción con perfil de velocidades comparados no son el trayecto más corto entre el punto de partida y de llegada, se dividieron dichos trayectos por tramos al momento de calcular el consumo con el *Trayecto Dinámico*. De esta manera se obtuvieron los datos comparados en la tabla 11.6.

Vehículo	Ciclo de conducción	Distancia (km)	Simulación pre-cargada (kWh)	Trayecto dinámico (kWh)	Diferencia relativa (%)
Renault Zoe 41 kWh	UTE-Cerro	9.05	1.848	1.917	+3.7
	Cerro-Fing	17.80	3.196	3.368	+5.4
	Fing- Mvd Shopping	4.71	0.885	0.955	+7.9
Renault Kangoo 22kWh	UTE-Cerro	9.05	2.252	2.073	-7.9
	Cerro-Fing	17.80	2.819	3.289	+16.7
	Fing-Mvd Shopping	4.71	0.981	0.954	-2.8
BYD YUAN	UTE-Cerro	9.05	1.910	1.901	-0.5
	Cerro-Fing	17.80	3.353	3.654	+9.0
	Fing-Mvd Shopping	4.71	1.183	1.081	-8.6

Tabla 11.6: Comparativa entre consumos de distintos ciclos de conducción y vehículos según simulación de perfiles de velocidad y la herramienta *Trayecto Dinámico*.

A partir de los resultados mostrados en la tabla anterior se puede afirmar que este método tiene un error aceptable, dado que posee una diferencia relativa respecto a la simulación del ciclo mediante el perfil de velocidades menor al 10% en prácticamente todas las simulaciones y teniendo en cuenta que éste se obtiene a partir de un rendimiento promedio urbano para cada vehículo y la distancia del trayecto. Para el caso en que la diferencia relativa es del 16.7%, no se puede responsabilizar esta discrepancia a este método dado que analizando todos los resultados, el consumo de el *Renault Kangoo* mediante la simulación pre-cargada en este ciclo parece no corresponderse de igual forma con la distancia del trayecto como lo hacen las demás simulaciones.

Capítulo 12

Resultados del modelo desarrollado

En el presente capítulo se muestran los resultados de las implementaciones realizadas en el software que no cuentan con una validación formal. En el mismo se enseña la influencia de la degradación por edad y por ciclado en la batería y la incidencia de estos factores en la temperatura de la misma. A su vez se observa la influencia de la variación de la potencia de carga en su estado de salud. Finalmente se exhibe el comportamiento del BMS como forma de mantener la operación de la batería a temperaturas dentro de la zona de operación segura de las mismas. Con la finalidad de analizar estos efectos mencionados anteriormente, se realiza la simulación para un único vehículo, siendo el mismo el Renault Zoe 22 kWh.

12.1. Comparativa entre vehículo nuevo y usado

Como forma de mostrar la incidencia de la degradación por edad y por ciclado en la batería, se procede a realizar una comparativa entre el vehículo en estado de fábrica y el mismo con cierto grado de uso variando su kilometraje y su edad en años para el ciclo de conducción WLTP clase 3 a una temperatura ambiente de 25°C. Para la variación del kilometraje y la edad del vehículo se toma como referencia la garantía dada por el fabricante, el cual asegura un kilometraje de 160.000km y una edad de 8 años.

12.1.1. Comportamiento de la resistencia interna

En esta sección se observa el comportamiento de la resistencia interna de la batería ante la variación del kilometraje y años del vehículo. En la figura 12.1 se muestra la influencia de la degradación en la batería al variar los parámetros anteriormente mencionados.

Capítulo 12. Resultados del modelo desarrollado

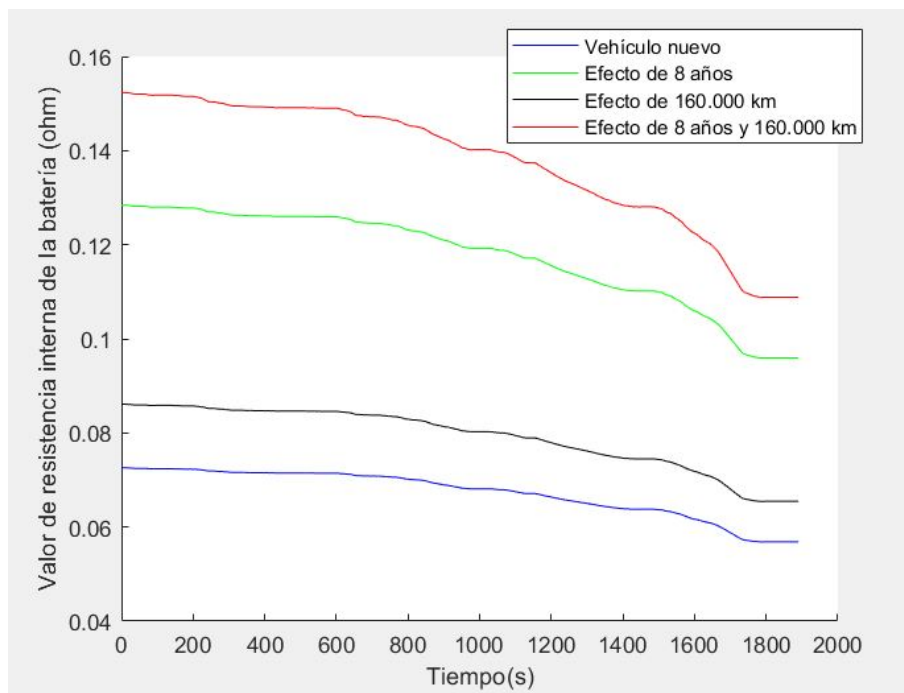


Figura 12.1: Influencia del kilometraje y años del vehículo en la resistencia interna de la batería.

Como se puede observar en la figura anterior, se denota que los efectos de degradación por kilometraje y por años del vehículo realizan un aumento sostenido del valor de la resistencia interna al simularlos por separado. A la vez se distingue que el efecto de degradación por edad posee un mayor peso a la hora de aumentar el valor de dicha resistencia. Como se informó en el capítulo 9, la influencia de los efectos de degradación se superponen, multiplicándose sus factores, teniendo así un aumento considerable en éste valor, en comparación con el del vehículo nuevo.

12.1. Comparativa entre vehículo nuevo y usado

12.1.2. Comportamiento del SOC

En esta sección se observa la influencia de los efectos de degradación por edad y kilometraje en el comportamiento del SOC ante la simulación del vehículo para un mismo recorrido. En la figura 12.2 se pueden contemplar dichos efectos.

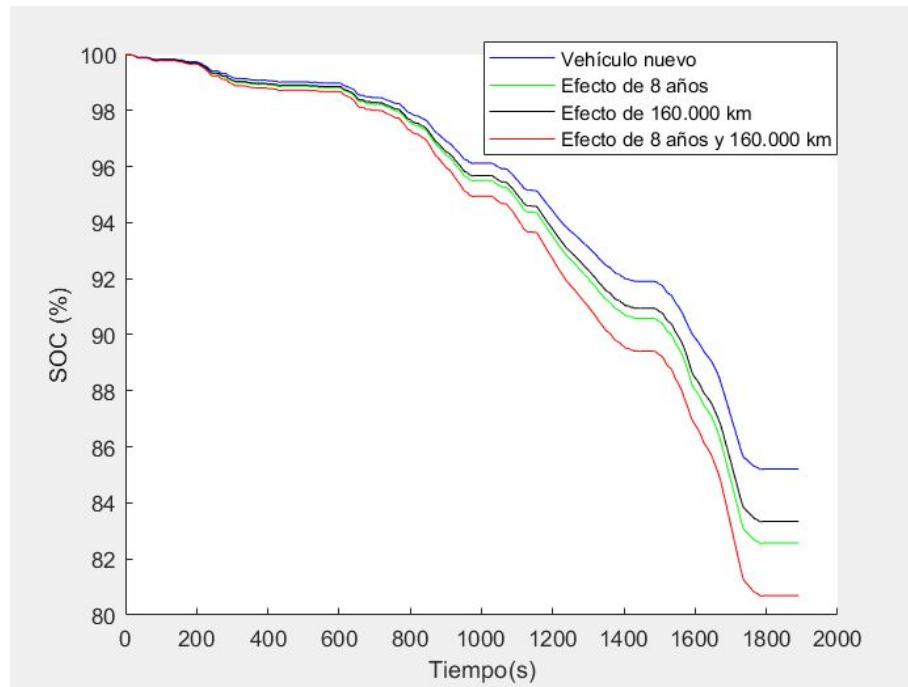


Figura 12.2: Influencia del kilometraje y años del vehículo en el nivel de SOC en la simulación del ciclo WLTP clase 3.

Como se puede apreciar en la figura anterior, la degradación de la batería por edad y por kilometraje suponen una disminución en el valor final del SOC luego de simular el ciclo de conducción de referencia. Esto se explica por la superposición de la pérdida de energía en la resistencia interna y la disminución de la capacidad de almacenamiento de la batería.

12.1.3. Comportamiento de la temperatura de la batería

En este apartado se observa la influencia de los efectos de degradación por kilometraje y años del vehículo en el calentamiento de la batería en la simulación de un ciclo de conducción. La simulación de estos efectos se puede apreciar en la figura 12.3.

Capítulo 12. Resultados del modelo desarrollado

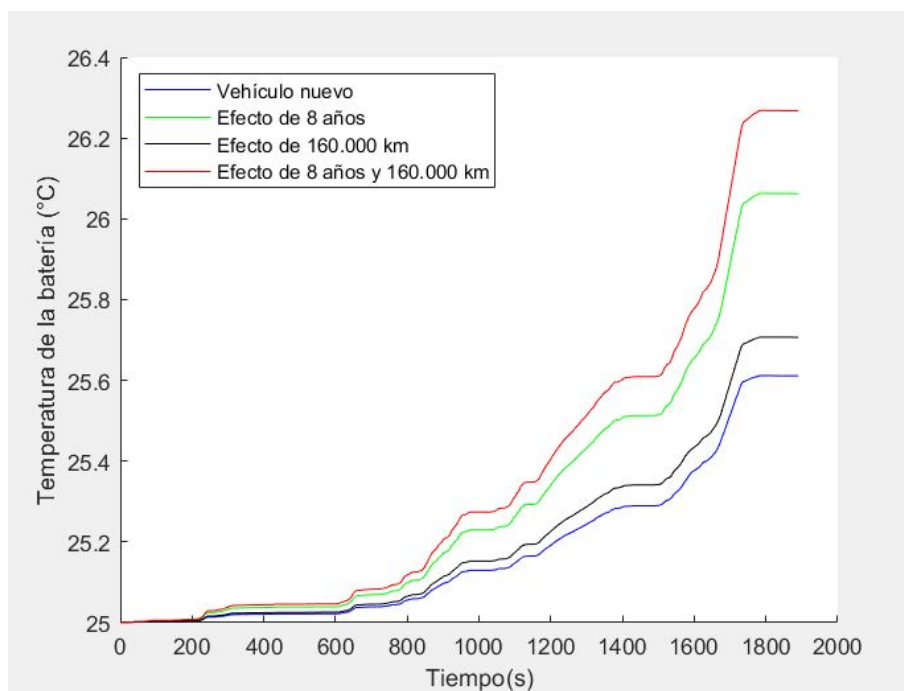


Figura 12.3: Influencia del kilometraje y años del vehículo en la resistencia interna de la batería.

Como se puede distinguir de la figura anterior, al considerar los efectos sobre la batería que surgen al degradar por ciclado y por edad, es claro notar que la temperatura se ve incrementada. Si se analizan los resultados de la figura 12.3, se observa que el efecto individual de mayor influencia sobre la temperatura, es la degradación por edad. A su vez, si se considera que ambos efectos se aplican al mismo tiempo, los factores de éstos se multiplican, logrando una degradación aún mayor y por consiguiente una temperatura mayor.

Se procede a analizar si estos resultados reflejados por el software son coherentes con las hipótesis establecidas. Se observa que como fue visto en la figura 12.1, la resistencia interna de la batería incrementa su valor al degradar la batería. A su vez, el valor de la corriente que circula por la batería también se ve incrementado, dado que ante un aumento de la resistencia interna, las pérdidas en la batería aumentan, por lo que como forma de suplir las exigencias del motor, es necesario exigirle a la batería una corriente superior.

Como fue visto en el capítulo 8 correspondiente al estudio de los BMS, el incremento de estos parámetros conlleva a que las pérdidas por efecto Joule sean mayores ($P_{Joule} = R_{int} * I_{bat}^2$). Esto genera que la temperatura de la batería se vea incrementada, lo cual es coherente con el resultado mostrado en la figura 12.3.

12.2. Comportamiento del SOH de la batería ante la variación de la potencia de carga

12.2. Comportamiento del SOH de la batería ante la variación de la potencia de carga

En esta sección se analizan los efectos sobre el SOH de la batería que surgen al variar la potencia de carga. Al igual que para la sección anterior, dicho análisis se realiza a partir del trayecto WLTP clase 3 realizado con el Renault Zoe 22 kWh. Para el mismo se establece que la temperatura del ambiente es de $25^{\circ}C$.

Una vez realizada la simulación del ciclo mencionado en el software bajo las condiciones establecidas, se procede a analizar el comportamiento del SOH. Para ello se determina el límite de SOH deseado por el usuario, generalmente los fabricantes garantizan hasta un 80 %, por lo que para esta oportunidad se elige dicho valor como límite. Por otro lado, se elige cuantas veces se desea realizar el ciclo de conducción por semana, donde se determina que el mismo se realiza 10 veces a la semana. Luego de ingresados los datos solicitados por el programa, se observan los resultados que muestra el software ante las diferentes condiciones de carga establecidas. Por lo que se realiza un cuadro comparativo (ver tabla 12.1) que muestra dichos resultados:

Temperatura	Tipo de carga	Tiempo hasta igualar el 80 % del SOH	Kilómetros recorridos hasta igualar el 80 % del SOH
$25^{\circ}C$	Estándar (P=7,4 kW)	7 años y 7 meses	84.560 km
	Semi rápida (P=22 kW)	7 años y 2 meses	79.767 km
	Rápida (P=43 kW)	6 años y 10 meses	75.882 km

Tabla 12.1: Influencia en el estado de salud de la batería al alterar el tipo de carga realizado.

Como se puede apreciar en la tabla 12.1, si se realiza una proyección a futuro del valor del SOH, es claro denotar que el tiempo hasta igualar el límite establecido se ve decrementado al realizar la carga a mayores potencias. Es por esta razón, que se decide mostrar de forma gráfica los resultados vistos en la tabla anterior, con la finalidad de mostrar la evolución de esta influencia en el SOH en función del tiempo. En la siguiente figura se puede apreciar ésta caracterización:

Capítulo 12. Resultados del modelo desarrollado

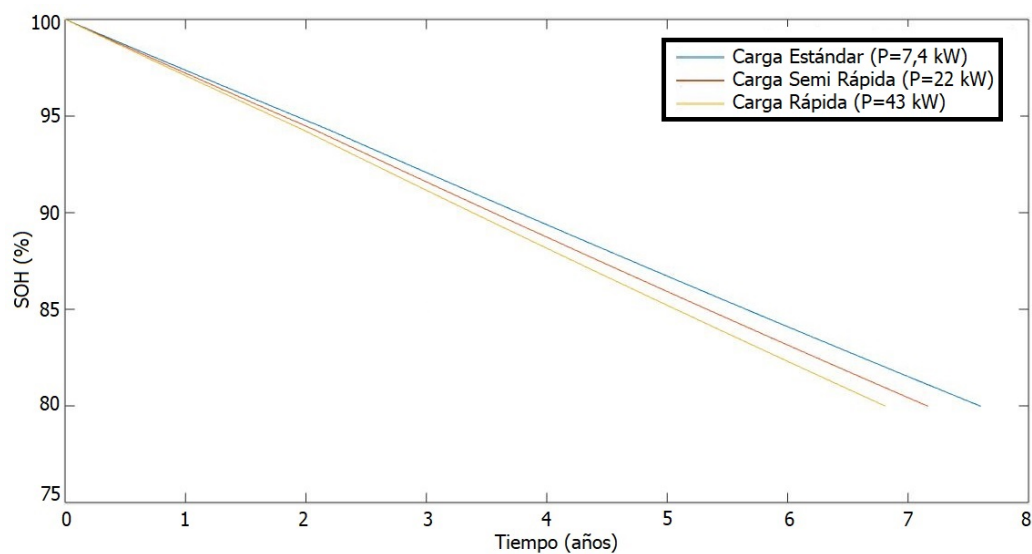


Figura 12.4: Influencia en el SOH al variar el tipo de carga realizado y degradarlo en edad.

Al analizar los resultados que se obtienen en el software, se observa que la variación del tipo de carga con el que se recarga la batería, incide de manera directa en el estado de salud de la batería SOH como se aprecia en la figura 12.4.

Por lo tanto, a modo de resumen, si se analizan los resultados reflejados por el software ante una carga de tipo estándar, semi rápida o rápida, se observa que el mayor tiempo y la mayor cantidad de kilómetros posibles que se puedan realizar hasta obtener un 80% del SOH, será siempre que se realice una carga de tipo estándar, es decir, a la menor potencia de carga posible. A su vez, cuanto mayor sea la potencia a la que se realice la carga (siempre y cuando el cargador del vehículo lo tolere), menor será el tiempo y los kilómetros posibles a realizar hasta que el SOH llegue a su límite establecido. Esto verifica lo estudiado en el capítulo 5.

12.3. Actuación del BMS para la operación a temperaturas dentro de la zona de operación segura

12.3. Actuación del BMS para la operación a temperaturas dentro de la zona de operación segura

En esta sección se exhibe el comportamiento del BMS como forma de mantener la temperatura de trabajo de la batería dentro de la zona de operación segura (SOA). Se observa dicho comportamiento para una temperatura de trabajo igual al límite superior del SOA y para una temperatura de trabajo menor al límite inferior del SOA.

12.3.1. Límite superior del SOA

Como forma de evitar la operación fuera del límite superior de la zona de operación segura, el BMS actúa activando la ventilación forzada del vehículo y limitando la corriente que la batería es capaz de proporcionar. Estas acciones se enseñan por separado y se utiliza para la simulación en el software el Renault Zoe de 22kWh y el ciclo de conducción en ruta .

Ventilación forzada

Para la visualización de este efecto se impone una temperatura inicial de la batería de 39,95°C y una temperatura ambiente de 25°C. Al simular el ciclo de conducción la batería aumenta su temperatura hasta llegar al límite superior del SOA donde se activa la acción del BMS. Véase la figura 12.5.

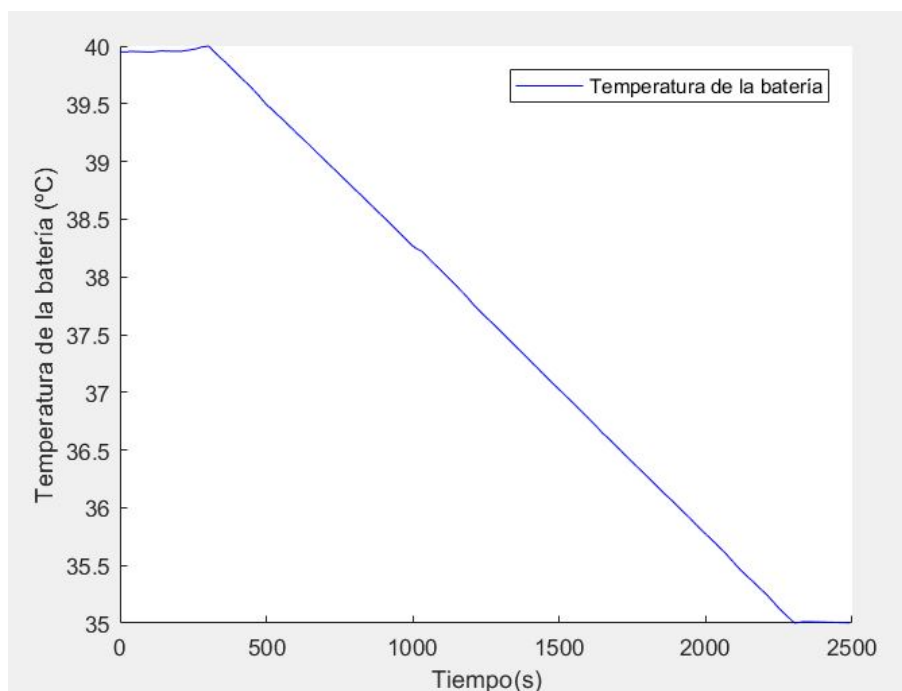


Figura 12.5: Actuación de la ventilación forzada por parte del BMS.

Capítulo 12. Resultados del modelo desarrollado

Como se puede apreciar la acción del BMS se activa al arribar a una temperatura de batería de 40°C encendiendo la ventilación forzada. En ese instante comienza a decaer la temperatura de la batería de forma sostenida hasta una los 35°C . Para esta temperatura se apaga la ventilación forzada por lo que la temperatura de la batería comienza nuevamente a elevarse dado que aún se está ejecutando el ciclo de conducción.

Limitación de corriente entregada por la batería

Para la visualización de este efecto se imponen dos escenarios distintos para los cuales se enseña la corriente entregada por la batería. El primer escenario corresponde a temperatura ambiente y temperatura de la batería iguales a 25°C y el segundo a una temperatura de la batería de 50°C manteniendo la temperatura ambiente constante e igual a 25°C . En la figura 12.6 se puede observar el comportamiento de la corriente por la batería para ambos escenarios de funcionamiento.

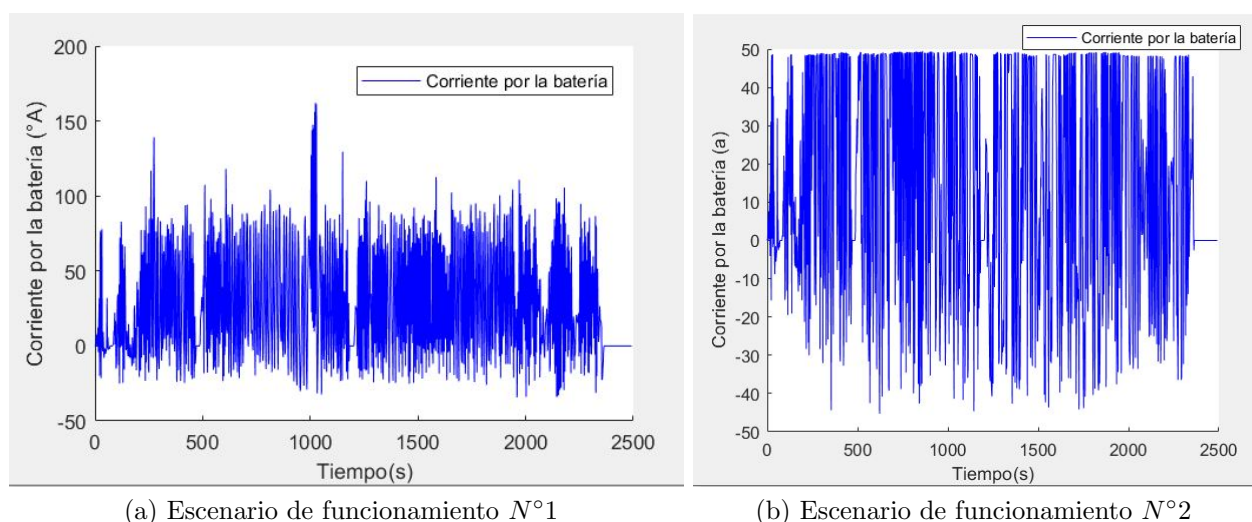


Figura 12.6: Corriente por la batería ante distintas temperaturas de funcionamiento de la batería.

Es posible observar en la figura 12.6b la corriente por la batería limitada por la acción del BMS. Esto se debe a que para este escenario la temperatura de la batería se encuentra fuera de la zona de operación segura por lo cual el BMS se encarga de limitar la misma como forma de mantener la integridad física de la batería.

12.3.2. Límite inferior del SOA

Como fue estudiado en el capítulo 8, el BMS actúa siempre y cuando note que el comportamiento de la batería esté por fuera de la zona de operación segura. Es

12.3. Actuación del BMS para la operación a temperaturas dentro de la zona de operación segura

por ello, que una de sus limitantes es que la batería no debe funcionar cuando la temperatura de la misma se encuentra en valores inferiores a los $0^{\circ}C$.

Si se considera que la temperatura ambiente es de $-10^{\circ}C$. Al colocar este parámetro en el sistema como condición inicial y realizar una simulación, el mismo muestra el siguiente cartel de advertencia para el usuario.

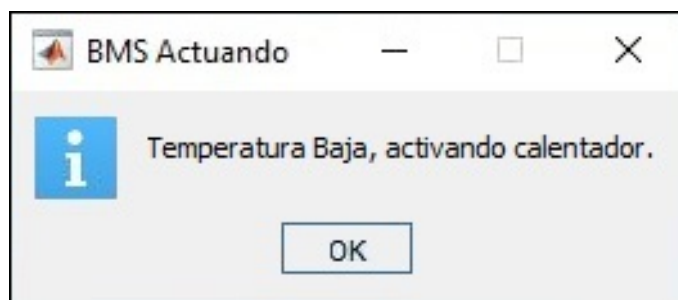


Figura 12.7: Advertencia por temperatura baja.

A su vez, el sistema automáticamente muestra cuál es el estado de carga de la batería previo a comenzar a realizar el trayecto solicitado. Cabe destacar que la temperatura de la misma queda dentro del área de operación segura ($0^{\circ}C$), de forma de que el trayecto que se seleccionó pueda realizarse.

A la hora de analizar los resultados, se sabe que la batería del Renault Zoe 22kWh pesa $M_{bat} = 290kg$, por lo que el calor utilizado para el precalentamiento fue de $Q_{precalentamiento} = 3460.67$ kJ.

Para determinar cuál es el valor de la energía que se requirió en el precalentado, se divide el calor entre 3600 para convertir de J a Wh. Por lo tanto, a partir de la energía utilizada en el precalentamiento se determina cual es el estado de carga (SOC) disponible.

$$E_{precal} = 0,961kWh \Rightarrow Carga_{consumida} = \frac{E_{precal}}{E_{total}} = \frac{0,961kWh}{22kWh} = 4,37\% \quad (12.1)$$

Finalmente en la figura 12.8 se observa cual es el SOC al momento de iniciar la simulación del ciclo de conducción solicitado. Como se observa, la distancia acumulada indicada es de 0 km y el estado de carga inicial es la resta planteada entre el 100 % y la $Carga_{consumida}$ de 4,37 %.

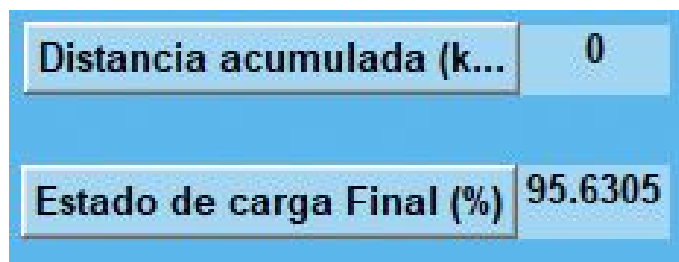


Figura 12.8: Estado de carga inicial luego del precalentamiento.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 13

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones finales del presente proyecto. Las mismas se dividen en dos secciones, donde se comienza exponiendo las conclusiones correspondientes al modelo desarrollado y sus implementaciones, y por último las respectivas al ciclo de conducción realizado en ruta.

13.1. Modelo desarrollado

El presente proyecto consta de un software capaz de simular el comportamiento de un vehículo eléctrico y su batería. El mismo toma como base el estudio titulado “Baterías en Vehículos Eléctricos conectados a la Red” [1], el cual se complementó con nuevas funcionalidades e inclusión de modelos de distintos fenómenos que alteran el funcionamiento de la batería; los mismos no habían sido considerados anteriormente. A continuación se detallan las conclusiones para cada una de las implementaciones realizadas en el software, siendo las mismas descritas anteriormente en el capítulo 9.

13.1.1. Resistencia interna de la batería

La resistencia interna constituye uno de los parámetros fundamentales estudiados en las baterías de los vehículos eléctricos. Esto se debe al impacto negativo que tiene la misma sobre el desempeño de la batería, es por eso que uno de los objetivos principales de este proyecto fue modelar su comportamiento.

A partir de artículos científicos y estudios realizados por terceros de baterías reales que se utilizan en vehículos eléctricos, se logró caracterizar el comportamiento de la resistencia teniendo en cuenta tres grandes aspectos como lo son la influencia del SOC, influencia de la temperatura y degradación. El modelo generado de resistencia interna presenta un comportamiento acorde al funcionamiento real de una batería.

A pesar del hecho de que la caracterización de los fenómenos que afectan a la resistencia interna fue realizada a partir de artículos científicos y datos de pruebas en baterías reales realizadas por terceros, no existe una validación formal para este

Capítulo 13. Conclusiones

modelo, es decir, no se cuenta con una forma de realizar nuestros propios ensayos para verificar la veracidad del mismo. A su vez, para poder realizar dicho ensayo es necesario acceder a tecnología de la cual no disponemos, así como también a baterías reales de vehículos eléctricos.

Expresado lo anterior, a pesar de no contar con una validación formal del modelo realizado, el mismo permite caracterizar la influencia de estos efectos en la resistencia interna de la batería.

13.1.2. Estado de salud de la batería - SOH

La estimación del estado de salud de la batería se llevó a cabo mediante un nuevo algoritmo cuyo enfoque es la energía. A partir de la energía consumida en un determinado ciclo de conducción con un vehículo determinado y en conocimiento de las repeticiones semanales de dicho ciclo junto con el valor límite de SOH y el tipo de carga, se estima el tiempo de vida de la batería. Para dicha estimación, el algoritmo toma en consideración los efectos de la degradación de la capacidad de la batería, así como también la degradación de la resistencia interna y el impacto de los distintos tipos de carga al cual se somete la batería.

En lo que respecta a las variantes de tipo de carga que se le puede aplicar a la batería, se logró implementar un sistema que sea capaz de determinar la potencia con que se realizará la carga y mostrar la incidencia en el estado de salud de la batería. Se concluye que el mayor tiempo y la mayor cantidad de kilómetros posibles que se puedan realizar hasta obtener un 80 % del SOH, será siempre que se realice una carga de tipo estándar.

El comportamiento del nuevo algoritmo implementado fue satisfactorio, logrando validar el mismo al comparar los resultados de las simulaciones con las garantías que ofrecen los fabricantes en cuanto al límite de años y kilómetros de las baterías. A su vez, se verificó su funcionamiento al comparar los resultados obtenidos a partir del SAVE para el ensayo realizado en ruta con un error relativo del 3 %.

En función de los argumentos anteriores, se concluye que se realizó exitosamente una estimación del estado de salud para las baterías en vehículos eléctricos.

13.1.3. Frenado Regenerativo

En lo que respecta al frenado regenerativo, se buscó realizar una aproximación más certera a la ya existente en el modelo, lográndose implementar a partir de un estudio, un ajuste de la energía que se regenera con el Nissan Leaf para el ciclo de conducción WLTP clase 2.

A partir de dicho estudio, se calibran los límites de potencia que son solicitados por el motor, los cuales determinan el ajuste anteriormente mencionado. Cabe destacar que la implementación de una mejora en la estimación de la energía que se regenera en cada trayecto, influye directamente en el rendimiento de los vehículos eléctricos. Asimismo, se agregó la visualización de la potencia y la energía que se regenera para el ciclo de conducción que se desee realizar, brindando al usuario

13.1. Modelo desarrollado

una herramienta más que perfecciona las capacidades del software.

Finalmente, se logró validar la implementación realizada gracias al análisis del resultado de la energía regenerada para dicho ciclo de conducción, verificándose que el error relativo entre los datos aportados por la computadora a bordo del vehículo y los devueltos por la simulación del software fueron de aproximadamente un 5.6 %, considerándose éste un valor aceptable.

13.1.4. Inclusión del Vehículo Genérico

Esta implementación fue una de las más complejas de realizar dado que la misma supone la creación del modelo de un vehículo eléctrico a partir de una reducida cantidad de datos técnicos del mismo. Este hecho conlleva a realizar aproximaciones de muchos parámetros internos dentro del software como forma de completar el modelo solicitado. En base a esta observación, se denota al momento de validar la implementación, un error porcentual mayor al 10 % aceptado, el cual no supone una mayor sorpresa pues se priorizó la practicidad de la herramienta al requerir escasos datos técnicos.

A consciencia de la fuente de error de esta implementación y basándonos en el hecho de que los resultados del modelo se mantienen en un entorno del 15 % de error (Véase la tabla 11.5), se concluye que esta herramienta permite al usuario visualizar el comportamiento de un vehículo eléctrico deseado, manteniendo un uso fácil y práctico.

13.1.5. Trayecto Dinámico

Se logró incorporar una herramienta que permite al usuario la elección de un trayecto urbano a simular que le sea de su interés, sin la necesidad de que éste se encuentre previamente cargado en el software. También se añadió la estimación del costo monetario que le representaría al usuario la realización de ese trayecto con el vehículo que haya seleccionado, para las diferentes tarifas eléctricas disponibles en la actualidad, sirviendo esta utilidad para darle una noción del precio que implica realizarlo mediante un vehículo eléctrico.

Los valores de consumos de energía obtenidos con esta herramienta en los trayectos urbanos que se encontraban ya relevados, en comparación con los recabados mediante las simulaciones, reflejaron una diferencia menor al 10 %, siendo ésta una forma de validar el método empleado. Se cree que esta herramienta diseñada enriquece el software debido a que éste permite al usuario estimar el consumo y costo de un trayecto que él realice a menudo, teniendo así una forma de comparar costos con respecto a su medio de transporte habitual.

13.1.6. Sistema de gestión de batería - BMS

Con la finalidad de implementar estrategias de control de la batería, fue necesario diseñar por completo un modelo térmico de ésta. Para el mismo se consideraron

Capítulo 13. Conclusiones

distintas variables que influyen en el comportamiento térmico de la batería. Se consideró que el calentamiento de la misma es consecuencia de la generación de calor por el efecto Joule en la resistencia interna de batería. A su vez se incluyó al modelo térmico de la batería el intercambio de calor con el ambiente por convección.

Por otro lado se desarrolló un controlador de temperatura de la batería, en dónde, para el caso que ésta sea inferior a $0^{\circ}C$, se activará un sistema de precalentamiento ajustando la temperatura de la misma a un valor óptimo de operación. A su vez, para el caso en que la temperatura supere los $40^{\circ}C$, se implementó un modelo de ventilación forzada, el cuál genera una disminución de la temperatura de la batería. Cabe destacar que se agregó al software la visualización del comportamiento de la temperatura de la batería durante el ciclo de conducción que se esté realizando.

Finalmente se implementaron limitantes para la corriente máxima de la batería, ya sea para la carga o descarga de la misma. Esto ajusta dichos valores a los recomendados por los fabricantes.

Expuesto lo anterior, se concluye que la implementación del sistema de control BMS, es un modelo que mejora el software existente, ya que se puede monitorear el valor de temperatura en la batería para cada trayecto. A su vez se impusieron límites de operación, de forma que la misma opere de manera segura. Si bien no se pudo validar el modelo implementado, creemos que el mismo colabora con una estimación más precisa del funcionamiento del vehículo eléctrico.

13.2. Ciclo de conducción en ruta

Con motivo de incluir al software un ciclo de conducción real que reúna las características de un perfil de velocidades elevadas con sus correspondientes datos de pendientes, se ensayó un ciclo de conducción en ruta con un vehículo real, siendo el mismo el Renault Zoe 22 kWh. A partir del análisis de los datos que se obtuvieron en dicho ensayo, se lograron validar parte de las implementaciones realizadas, tales como el algoritmo de SOH, consumo del vehículo en el trayecto y la energía recuperada por el frenado regenerativo.

Particularmente se observó que para el cálculo estimado del estado de salud de la batería, basado en los datos mostrados por el SAVE, el error relativo entre el mismo y la estimación realizada por el software, fue de un 3%. A su vez, se verificó que el consumo calculado por el software para dicho trayecto es aceptable con respecto al obtenido mediante el ensayo debido al bajo porcentaje de error relativo, el cual fue de un 5,87%. Finalmente el error relativo de la medida de energía regenerada entre la informada por la computadora a bordo del vehículo y la simulada es de 5.6%. Dado que estos resultados presentan un error relativo menor al 10% y al estar referidos a una prueba de campo, se concluye que las implementaciones mencionadas anteriormente son válidas.

Capítulo 14

Implementaciones futuras

14.1. Inclusión de super condensadores al modelo

Una implementación a realizar a futuro es el modelo de super condensadores. Algunas ventajas que se pueden relevar de este método:

- Almacena 20 veces más energía que un capacitor electrolítico.
- Se puede cargar y descargar miles de veces sin disminuir el rendimiento.
- Aumenta la vida útil de la batería.

Dado que el super condensador ayuda a mejorar el estado transitorio del vehículo durante el arranque, proporcionando una característica de descarga más suave para la batería y aumentando el rendimiento global del vehículo eléctrico. Se considera que dicho tema sería un complemento al estudio e implementaciones realizadas, ya que la tecnología está en auge, aunque actualmente no se encuentran en todos los VE.

14.2. Adaptación del software a vehículos híbridos

Se cree que el software diseñado se puede adaptar a este tipo de vehículos añadiendo un motor a combustión interna. Para ello será necesario modelar el motor a combustión junto al eléctrico en paralelo. Donde se podrá reflejar los resultados tanto para los vehículo enchufables, como para los no enchufables.

14.3. Ómnibus eléctricos

En la actualidad debido a que se están importando ómnibus eléctricos, e incorporándolos a la flota del transporte público, puede ser de gran interés por parte de los dueños de éstas empresas conocer el comportamiento de éstos ómnibus en trayectos que recorren habitualmente. Por lo que, se considera que el software se

Capítulo 14. Implementaciones futuras

puede adaptar de manera que se pueda modelar el funcionamiento de este vehículo. Para ello será necesario implementar en el software más de un motor eléctrico, ya que trabajan en conjunto, cabe destacar que para ésto se incluyen los super condensadores.

Capítulo 15

Guía del software para el usuario

Como es de conocimiento del lector, el presente proyecto se basa en el modelado y simulado de baterías en autos eléctricos, el cual se realiza a través de un software. Dado que el mismo es una herramienta a ser utilizada por un usuario que desconoce su funcionamiento, es de gran importancia el desarrollo de una guía para lograr un uso adecuado de sus funciones.

El objetivo de este capítulo es presentar una guía del software con la que un futuro usuario, podrá simular paso a paso distintos ciclos de conducción, efectuar carga y descarga de la batería de los vehículos con la red, observar el estado de salud de los mismos, así como también su comportamiento y comparar el rendimiento entre los distintos vehículos a elección.

15.1. Pasos iniciales

Para utilizar el programa, se debe abrir y luego ejecutar desde Matlab versión 2017-b el archivo .m nombrado *GUI_VirtualBat.m* el cual despliega la ventana gráfica inicial. Véase figura 15.1

En ella se encuentran tres botones:

- **Inicio:** Da comienzo al programa.

- **Info:** Provee información de los autores.

- **Salir:** Finaliza el programa.

Al elegir la opción **Inicio** se despliega la ventana gráfica principal. Véase figura 15.2.

Capítulo 15. Guía del software para el usuario



Figura 15.1: Ventana gráfica inicial del software

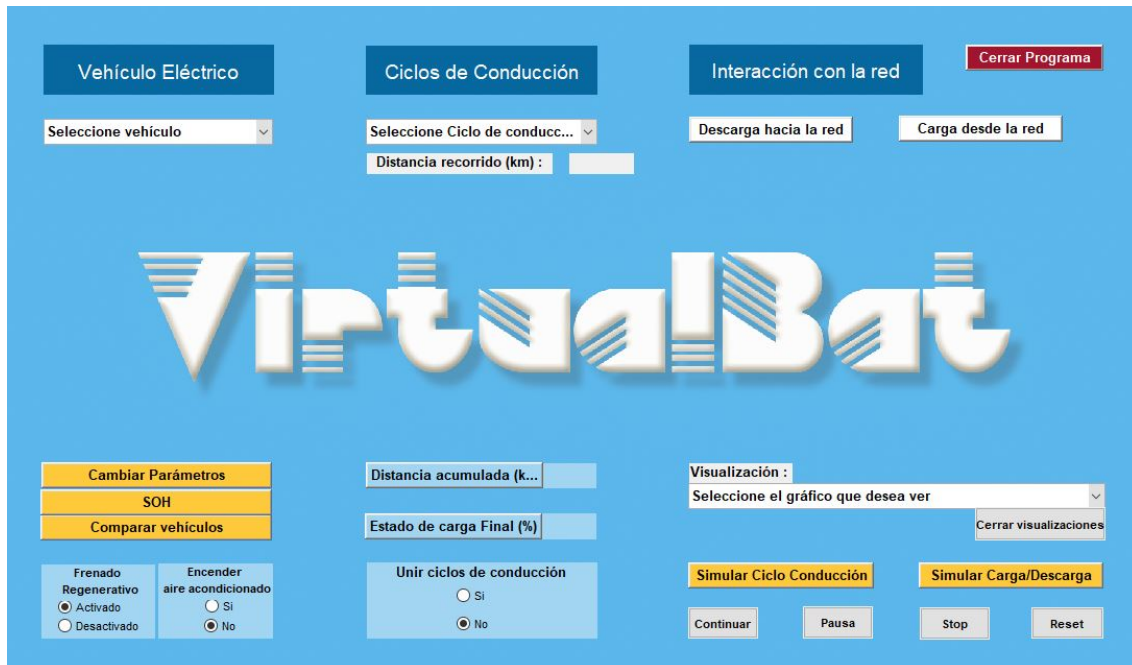


Figura 15.2: Ventana gráfica principal del software

En ella el usuario encontrará la totalidad de las funciones que dispone el programa.

15.2. Simular ciclo de conducción

Para realizar una simulación se debe comenzar por elegir el vehículo deseado. Los mismos se encuentran en forma de listado como se ve en la figura 15.3. En caso de que el usuario desee otro vehículo que no se encuentre cargado en el software previamente, puede utilizar la opción de vehículo genérico que se ubica al final del listado, la misma será detallada en 15.2.1.



Figura 15.3: Ventana gráfica principal del software - Elección de vehículo eléctrico

Luego de seleccionado el vehículo se verá una imagen del mismo, acompañada de un tick verde el cual indica que la carga fue exitosa. En estas condiciones es posible proseguir a la elección del ciclo de conducción. Véase figura 15.4.

Al igual que el vehículo eléctrico, los ciclos de conducción se despliegan como lista y en la última posición del listado se encuentra el trayecto dinámico, la finalidad de éste es proporcionar al usuario la posibilidad de realizar un trayecto de su elección que no se encuentre cargado en el sistema. Esta función se detalla más adelante en 15.2.2. Luego de seleccionado el ciclo de conducción aparecerá un tick verde indicando carga exitosa.

Capítulo 15. Guía del software para el usuario



Figura 15.4: Ventana gráfica principal del software - Elección de ciclo de conducción

Previo a la simulación, es posible elegir si realizar la misma con el aire acondicionado del vehículo encendido o apagado. Lo mismo ocurre con el frenado regenerativo. A la vez el programa permite cambiar parámetros del vehículo, motor, batería, ambiente y potencia de carga y descarga contra la red. Esta función será detallada más adelante en 15.2.3

Finalmente existe la opción de unir ciclos de conducción. La misma salva los datos del vehículo durante el ciclo de conducción manteniéndolos al comienzo de un nuevo ciclo, es decir, permite al usuario evaluar el comportamiento del auto concatenando varios ciclos de conducción. Estas opciones se señalan en la figura 15.5.

15.2. Simular ciclo de conducción

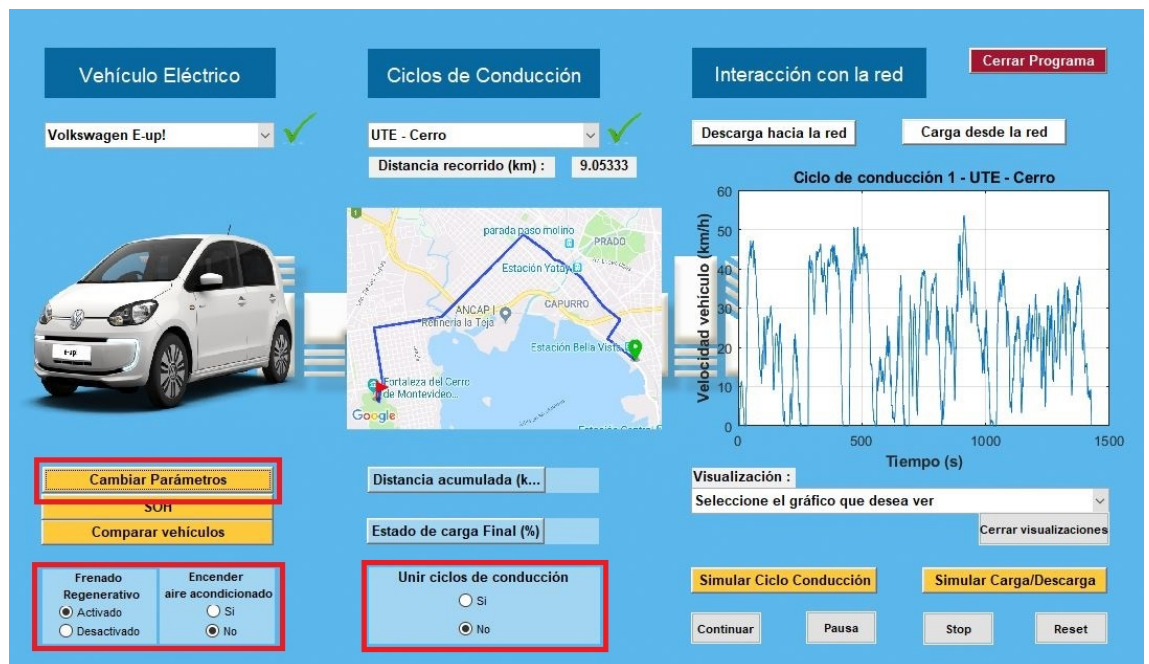


Figura 15.5: Ventana gráfica principal del software - Cambios previo a la simulación del ciclo de conducción

Una vez elegidas las condiciones de simulación, para dar comienzo a la misma se debe presionar en **Simular Ciclo de Conducción**. Luego es posible controlar la misma con los botones de **Continuar**, **Pausa**, **Stop** y **Reset**. Véase figura 15.6.

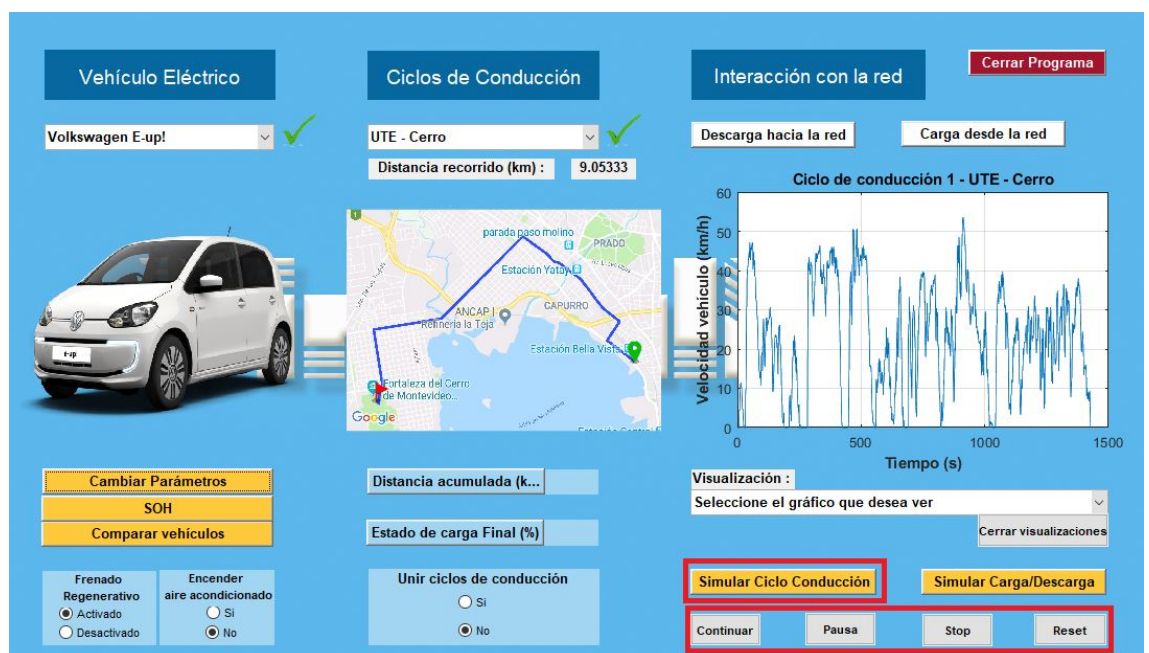


Figura 15.6: Ventana gráfica principal del software - Comienzo simulación

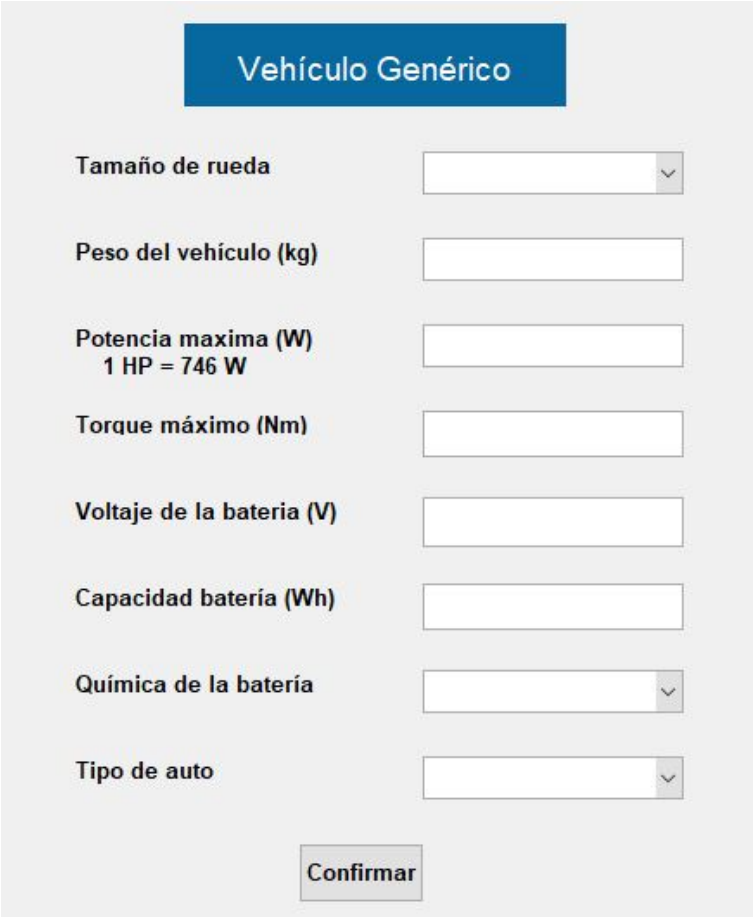
Capítulo 15. Guía del software para el usuario

En todo momento de la simulación e incluso una vez finalizada la misma, es posible presionar el botón **Distancia acumulada (km)** o **Estado de carga Final (%)** lo cual producirá que ambos actualicen sus valores y los desplieguen, enseñando de esta manera la distancia recorrida en el o los ciclos de conducción realizados y el estado de carga de la batería del vehículo al finalizar dichos ciclos. Además es posible observar el comportamiento del vehículo y la batería del mismo durante el ciclo simulado o al finalizar este último, el software cuenta con una herramienta que permite visualizar dichos comportamientos. Será desarrollada más adelante en 15.5.

15.2.1. Vehículo genérico

Esta función atiende a la necesidad de simular un vehículo eléctrico que no se encuentre previamente cargado en el software. Al momento de realizar la elección del vehículo eléctrico es posible acceder a esta función como fue mencionado previamente.

Al elegir el vehículo genérico, el software despliega la ventana gráfica principal de esta función. En ella el usuario deberá cargar los datos que se soliciten en el orden que se solicitan. Véase figura 15.7.



La imagen muestra una interfaz de usuario para configurar un vehículo genérico. El título de la ventana es "Vehículo Genérico". Hay siete campos de entrada:

- Tamaño de rueda: campo de selección con una flecha hacia abajo.
- Peso del vehículo (kg): campo de texto.
- Potencia máxima (W): campo de texto, con la leyenda "1 HP = 746 W" debajo.
- Torque máximo (Nm): campo de texto.
- Voltaje de la batería (V): campo de texto.
- Capacidad batería (Wh): campo de texto.
- Química de la batería: campo de selección con una flecha hacia abajo.
- Tipo de auto: campo de selección con una flecha hacia abajo.

En la parte inferior central hay un botón que dice "Confirmar".

Figura 15.7: Ventana gráfica principal del Vehículo Genérico

Los datos solicitados son de fácil obtención a través de la ficha técnica del vehículo que el usuario desee simular. Con ellos el software genera internamente un modelo de vehículo capaz de ser simulado con cualquier ciclo de conducción que se elija posteriormente.

Los datos se cargan escribiendo sobre los recuadros designados de cada ítem o bien eligiéndolos de la lista en el caso que corresponda. Una vez completados todos los datos se debe dar **Confirmar**, automáticamente se cerrará la venta y se

Capítulo 15. Guía del software para el usuario

retornará a la ventana gráfica principal del software. Al igual que con los vehículos pre cargados se deberá observar un tick verde que indicará carga exitosa.

15.2.2. Trayecto dinámico

En la figura 15.8 se muestra la ventana gráfica principal del trayecto dinámico. Además de la presente guía de usuario, esta función cuenta con su propia guía de uso en el software.

The image shows a software window titled "Trayecto Dinámico". It features a "Guía de uso" button at the top left. Below it, there is a dropdown menu for "Departamento de referencia del trayecto urbano" with the text "Seleccione Departamento". The form includes input fields for "Distancia del trayecto" (with a "(km)" label), "Duración del viaje" (with "hs" and "min" labels), "Consumo del viaje" (with a "kWh" label), and "Costo del viaje" (with a "\$" label). At the bottom right, there are two buttons: "Realizar Trayecto" (yellow) and "Cancelar" (red). A large, stylized "VirtualBat" logo is overlaid on the form.

Figura 15.8: Ventana gráfica principal - Trayecto dinámico

El funcionamiento básico del trayecto dinámico consiste en solicitar a un usuario que ingrese origen y destino del ciclo de conducción deseado para luego estimar la duración de dicho ciclo, consumo y kilómetros recorridos.

Se comienza por seleccionar el departamento de origen del ciclo. Véase figura 15.9.

15.2. Simular ciclo de conducción



Figura 15.9: Ventana gráfica principal - Trayecto dinámico - Elección departamento de origen

Una vez seleccionado, el software despliega una ventana emergente con un mapa del departamento elegido. Para desplazarse en el mismo se debe utilizar la herramienta "Pan" y para realizar zoom las herramientas de "Lupa" o el scroll del ratón. Véase figura 15.10.

Capítulo 15. Guía del software para el usuario

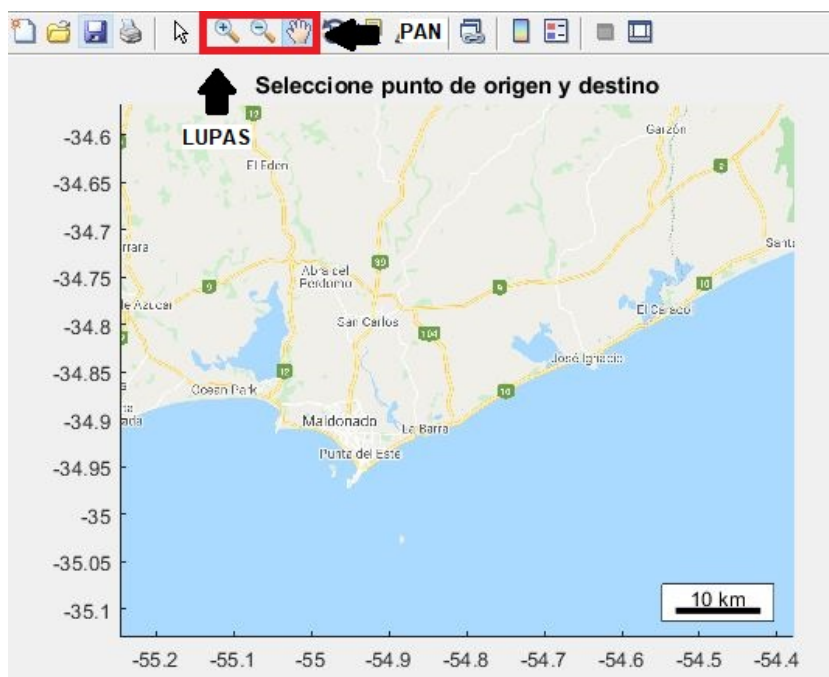


Figura 15.10: Mapa del departamento elegido - Elección del punto de origen

Definido el punto de origen del ciclo de conducción se debe proceder a guardar el mismo; para ello se debe presionar la tecla “Intro” del teclado de la computadora por lo que aparecerá en el mapa un cursor, el mismo se mueve con el ratón y al dar “click” guarda el punto de origen del ciclo deseado. Véase figura 15.11.

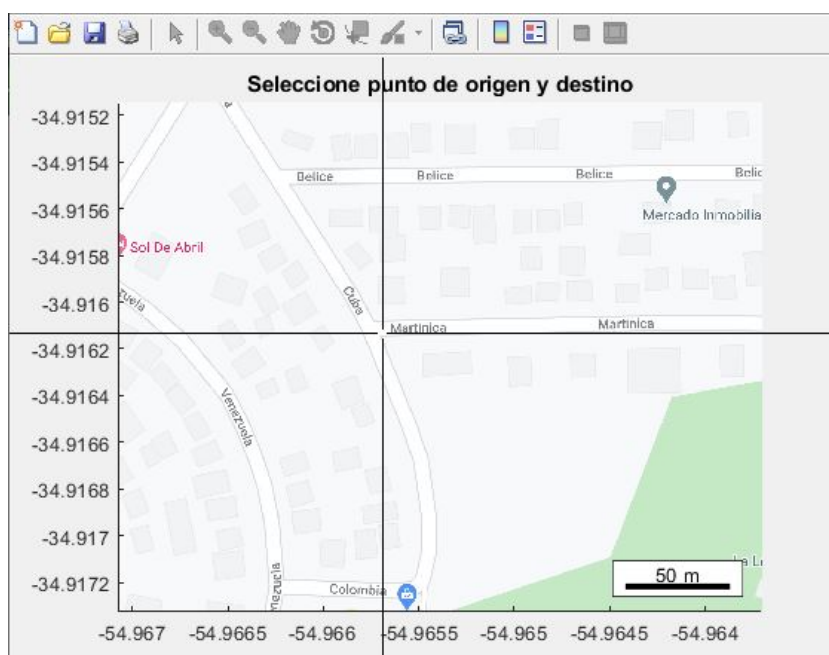


Figura 15.11: Mapa del departamento elegido - Elección del punto de origen

15.2. Simular ciclo de conducción

Automáticamente el mapa vuelve a su representación original en el departamento seleccionado anteriormente. Para elegir el destino del ciclo de conducción debe repetirse el mismo proceso. Una vez seleccionado el destino, el software abre el navegador de la pc y enseña el ciclo a realizar. Véase figura 15.12. Para simular el ciclo elegido es necesario dar en **Realizar Trayecto**, automáticamente se mostrarán los kilómetros recorridos, tiempo del ciclo y consumo del vehículo al finalizar el ciclo. Véase figura 15.13.

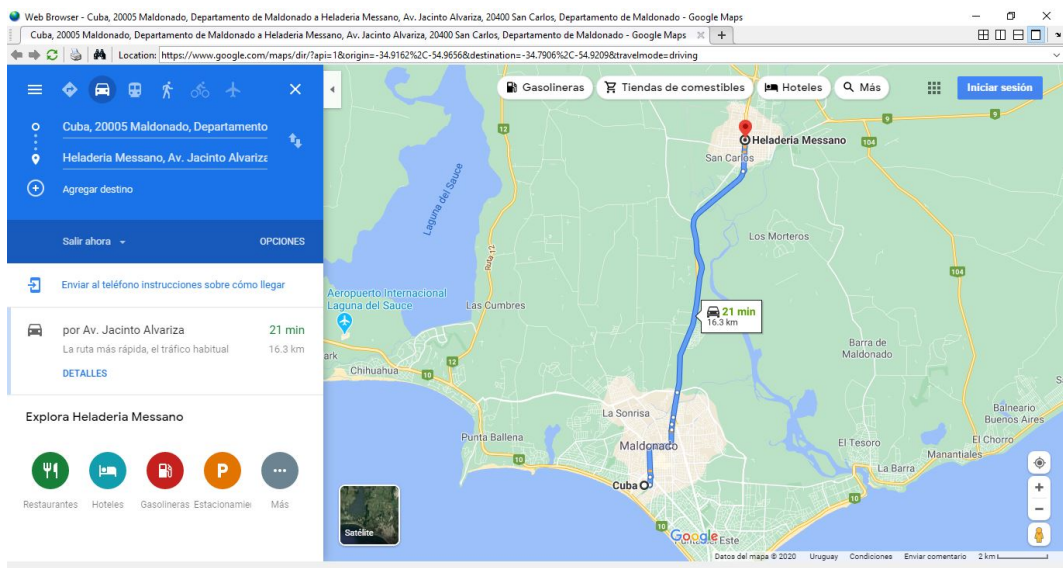


Figura 15.12: Mapa del departamento elegido - Elección del punto de origen



Figura 15.13: Mapa del departamento elegido - Elección del punto de origen

15.2.3. Cambiar parámetros

Como forma de modificar la simulación, el usuario encontrará en esta función la posibilidad de realizar cambios en el vehículo, batería, motor, temperatura ambiente y comportamiento con la red. Los mismos deben realizarse previo al comienzo de dicha simulación. En la figura 15.14 se muestra la ventana gráfica de esta herramienta.

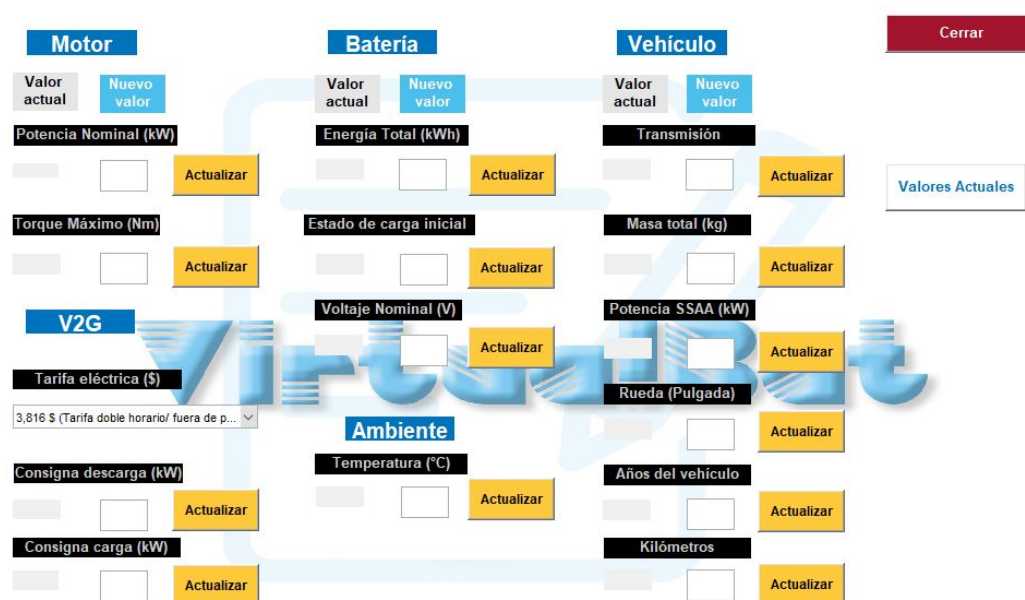


Figura 15.14: Ventana gráfica principal Cambiar Parámetros

Todos los parámetros que se pueden modificar son determinados previamente por el usuario al momento de elegir el vehículo eléctrico deseado, los mismos pueden visualizarse al tocar el botón “**Valores Actuales**”. Véase figura 15.15.

15.2. Simular ciclo de conducción

The screenshot shows a software interface for parameter management. It is organized into several sections: Motor, Batería, Vehículo, V2G, and Ambiente. Each section contains a list of parameters with their current values and input fields for new values. A 'Cerrar' button is located in the top right corner. A red box highlights the 'Valores Actuales' button on the right side of the interface.

Motor	Batería	Vehículo
Valor actual: 61	Valor actual: 16	Valor actual: 8.162
Nuevo valor: <input type="text"/>	Nuevo valor: <input type="text"/>	Nuevo valor: <input type="text"/>
Actualizar	Actualizar	Actualizar
Potencia Nominal (kW)	Energía Total (kWh)	Transmisión
61	16	8.162
Torque Máximo (Nm)	Estado de carga inicial	Masa total (kg)
210	100	1639
Actualizar	Actualizar	Actualizar
V2G	Voltaje Nominal (V)	Potencia SSAA (kW)
Tarifa eléctrica (\$)	374	0.5
3,816 \$ (Tarifa doble horario/ fuera de p...)	Actualizar	Actualizar
Consigna descarga (kW)	Ambiente	Rueda (Pulgada)
<input type="text"/>	Temperatura (°C)	15
Actualizar	25	Actualizar
Consigna carga (kW)	Actualizar	Años del vehículo
<input type="text"/>	Actualizar	0
Actualizar	Actualizar	Actualizar
		Kilómetros
		<input type="text"/>
		Actualizar

Figura 15.15: Ventana gráfica principal Cambiar Parámetros - Visualización de valores actuales

Para modificar cualquier parámetro de interés basta con introducir el valor en el recuadro correspondiente y presionar “**Actualizar**”, automáticamente el valor actualizado se desplegará en el cuadro adjunto. Véase figura 15.16.

This screenshot is identical to Figure 15.15, but with a red box highlighting the 'Años del vehículo' parameter. The 'Nuevo valor' field for 'Años del vehículo' now contains the number '5', and the 'Actualizar' button next to it is highlighted.

Motor	Batería	Vehículo
Valor actual: 61	Valor actual: 16	Valor actual: 8.162
Nuevo valor: <input type="text"/>	Nuevo valor: <input type="text"/>	Nuevo valor: <input type="text"/>
Actualizar	Actualizar	Actualizar
Potencia Nominal (kW)	Energía Total (kWh)	Transmisión
61	16	8.162
Torque Máximo (Nm)	Estado de carga inicial	Masa total (kg)
210	100	1639
Actualizar	Actualizar	Actualizar
V2G	Voltaje Nominal (V)	Potencia SSAA (kW)
Tarifa eléctrica (\$)	374	0.5
3,816 \$ (Tarifa doble horario/ fuera de p...)	Actualizar	Actualizar
Consigna descarga (kW)	Ambiente	Rueda (Pulgada)
<input type="text"/>	Temperatura (°C)	15
Actualizar	25	Actualizar
Consigna carga (kW)	Actualizar	Años del vehículo
<input type="text"/>	Actualizar	5
Actualizar	Actualizar	Actualizar
		Kilómetros
		<input type="text"/>
		Actualizar

Figura 15.16: Ventana gráfica principal Cambiar Parámetros - Cambio de valor en un parámetro

Para salir basta con presionar el botón de cerrar. La ventana gráfica se cerrará

Capítulo 15. Guía del software para el usuario

y se podrá proseguir con la simulación. Véase figura 15.17.

Motor	Batería	Vehículo
Valor actual: <input type="text"/> Nuevo valor: <input type="text"/>	Valor actual: <input type="text"/> Nuevo valor: <input type="text"/>	Valor actual: <input type="text"/> Nuevo valor: <input type="text"/>
Potencia Nominal (kW)	Energía Total (kWh)	Transmisión
<input type="text"/> Actualizar	<input type="text"/> Actualizar	<input type="text"/> Actualizar
Torque Máximo (Nm)	SOH (0..1)	Masa total (kg)
<input type="text"/> Actualizar	<input type="text"/> Actualizar	<input type="text"/> Actualizar
	Estado de carga inicial	Potencia SSAA (kW)
	<input type="text"/> Actualizar	<input type="text"/> Actualizar
	Voltaje Nominal (V)	Rueda (Pulgada)
	<input type="text"/> Actualizar	<input type="text"/> Actualizar
V2G		Años del vehículo
Consigna descarga (kW)		<input type="text"/> Actualizar
<input type="text"/> Actualizar	Ambiente	
Consigna carga (kW)	Temperatura (°C)	Ciclos
<input type="text"/> Actualizar	<input type="text"/> Actualizar	<input type="text"/> Actualizar

Figura 15.17: Ventana gráfica principal Cambiar Parámetros -

15.3. SOH - Estado de salud de la batería

En esta función el usuario podrá determinar la vida útil del vehículo seleccionado mediante la estimación de la vida útil de la batería, la cual es el propulsor de este tipo de tecnologías. Para el uso apropiado de esta función es necesario simular previamente un ciclo de conducción o varios ciclos de conducción anidados. Puede hallarse donde indica la figura 15.18.

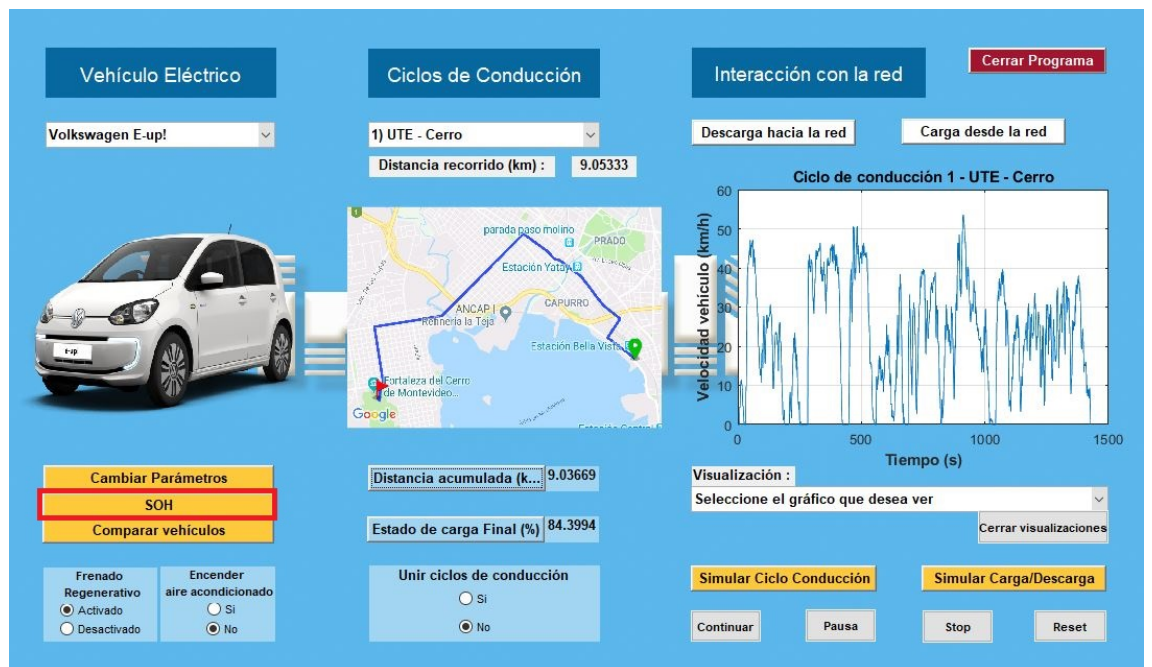


Figura 15.18: Ventana gráfica principal - Elección función de SOH

Una vez seleccionada, la función despliega una ventana gráfica como se puede observar en la figura 15.19. En ella se solicita al usuario que ingrese la cantidad de veces que realiza dicho ciclo por semana, el valor límite de SOH y el tipo de carga a la cual se somete la batería. Por valor límite de SOH se entiende el valor de capacidad de la batería del vehículo que indica el fin de la vida útil de la misma expresado en porcentaje con respecto a la capacidad inicial de la batería del vehículo.

Capítulo 15. Guía del software para el usuario

Cálculo de SOH

Introduzca la cantidad de veces a la semana que repite dicho ciclo:

Introduzca valor límite de SOH (%)

Seleccione tipo de carga

Confirmar

Cantidad de veces que puede repetir dicho ciclo tal que SOH iguale su valor límite

Cantidad de ciclos de conducción tal que SOH iguale su valor límite

Cantidad de kilometros recorridos km

Años Meses

Figura 15.19: Ventana gráfica principal - Estado de salud de la batería SOH

Los tipos de carga se dividen según la potencia de la misma en:

- **Carga estándar 7.4kW**
- **Carga semi rápida 22kW**
- **Carga rápida 43kW**

Una vez brindada la información necesaria por parte del usuario, se debe dar en **“Comenzar”**. Automáticamente se llenarán los campos vacíos permitiendo al usuario visualizar el tiempo de vida estimado de su vehículo bajo las condiciones definidas, es decir, con el límite de SOH impuesto en un ciclo determinado que se realiza una determinada cantidad de veces por semana y con un tipo de carga definido.

15.4. Simular carga y descarga del vehículo con la red

15.4. Simular carga y descarga del vehículo con la red

Para llevar a cabo cualquiera de estas dos simulaciones es necesario tener un vehículo seleccionado. El mismo se podrá cargar desde la red o descargar hacia la red según lo desee el usuario. Pueden ser llevadas a cabo sin haber simulado previamente un ciclo de conducción o bien ya realizadas varias simulaciones teniendo activado unir ciclos de conducción.

Análogo a la simulación del ciclo de conducción, una vez elegido el vehículo se debe seleccionar **“Descarga hacia la red”** o **“Carga desde la red”**, un tick verde aparecerá mostrando carga exitosa y será posible comenzar con la simulación. Véase figura 15.20.

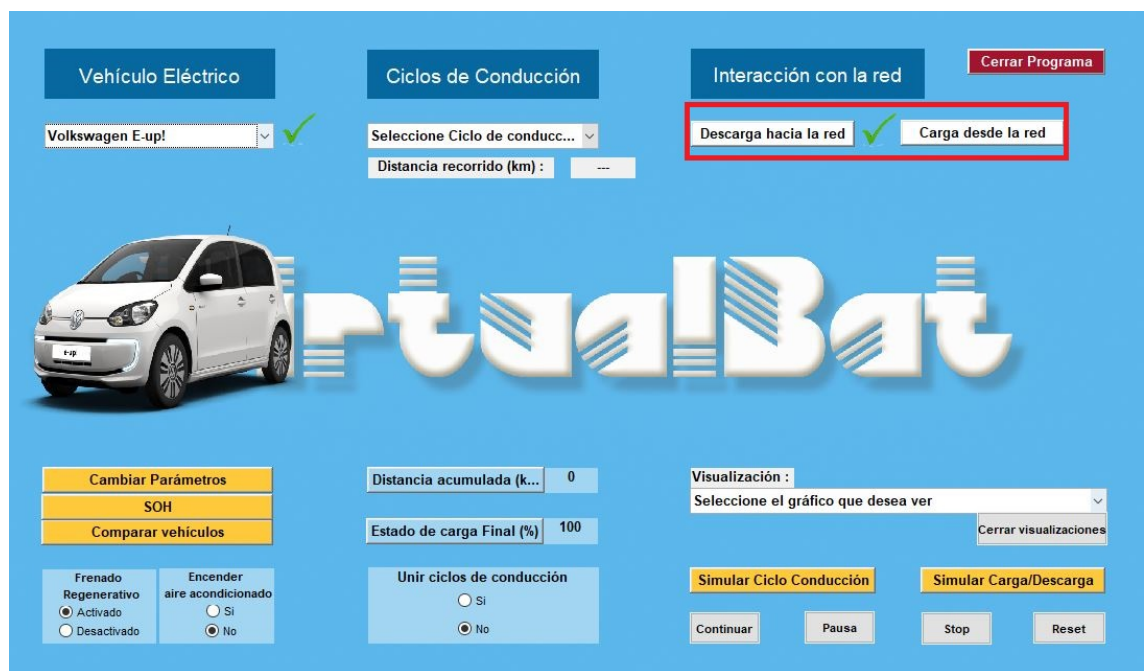


Figura 15.20: Ventana gráfica principal - Selección carga o descarga con la red

Para comenzar dicha simulación se debe seleccionar **“Simular Carga/Descarga”**, la misma puede ser controlada con los botones **“Continuar”**, **“Pausa”**, **“Stop”** y **“Reset”** y al igual que en la simulación de un ciclo de conducción, puede observarse el comportamiento de la batería del vehículo mediante las visualizaciones, las cuales se desarrollan más adelante en 15.5. Véase figura 15.21.

Capítulo 15. Guía del software para el usuario



Figura 15.21: Ventana gráfica principal - Selección carga o descarga con la red

15.5. Visualizaciones

En esta sección se verán las distintas visualizaciones disponibles para el usuario. Las mismas corresponden a gráficas en función del tiempo de simulación, a las cuales se pueden acceder durante la simulación así como también, una vez finalizada la misma, permiten al usuario conocer el funcionamiento del vehículo y la batería en el ciclo de conducción elegido. En la figura 15.22 se puede apreciar las visualizaciones disponibles, todas ellas con su nombre correspondiente y la unidad en la que se encuentran expresadas.

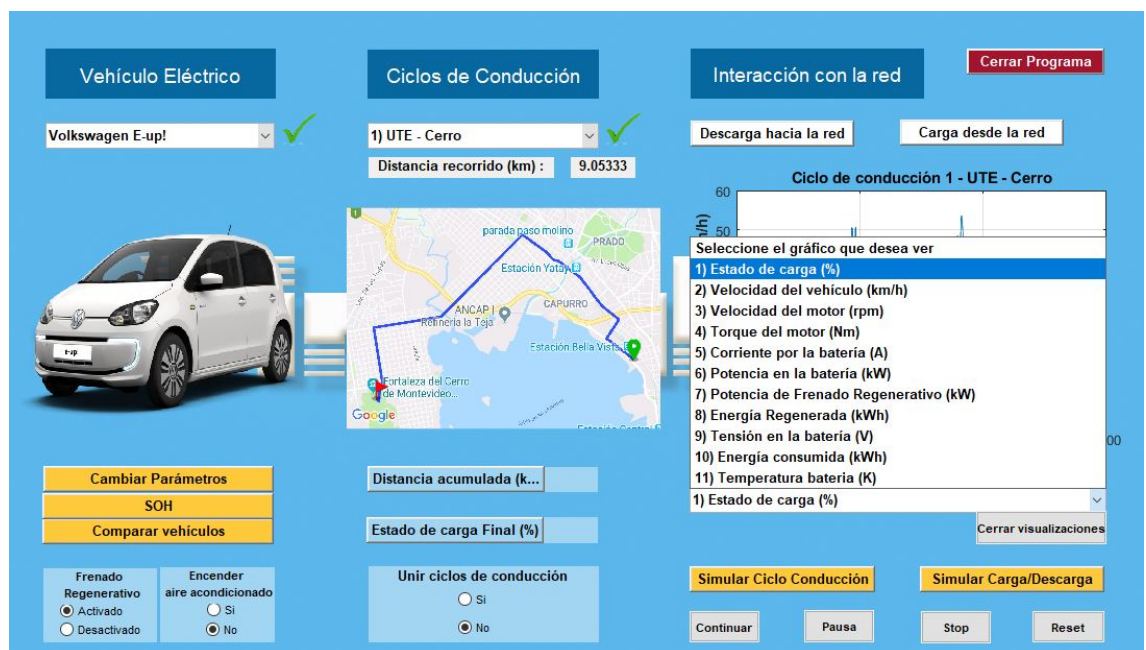


Figura 15.22: Ventana gráfica principal - Elección de visualizaciones

Para acceder a una visualización determinada, basta con seleccionarla de la lista de posibles visualizaciones. Véase figura 15.23.

Capítulo 15. Guía del software para el usuario

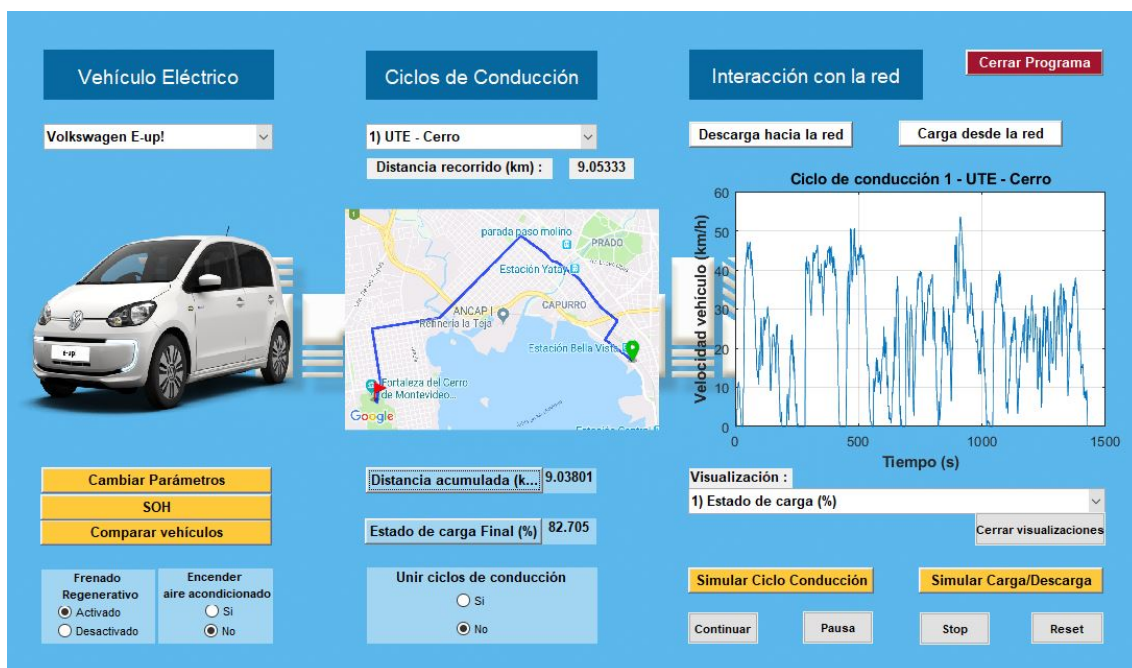


Figura 15.23: Ventana gráfica principal - Elección de visualizaciones - Estado de carga

Automáticamente se despliega la visualización deseada. A los efectos de esta guía se eligió el estado de carga de la batería. Véase la figura 15.24.

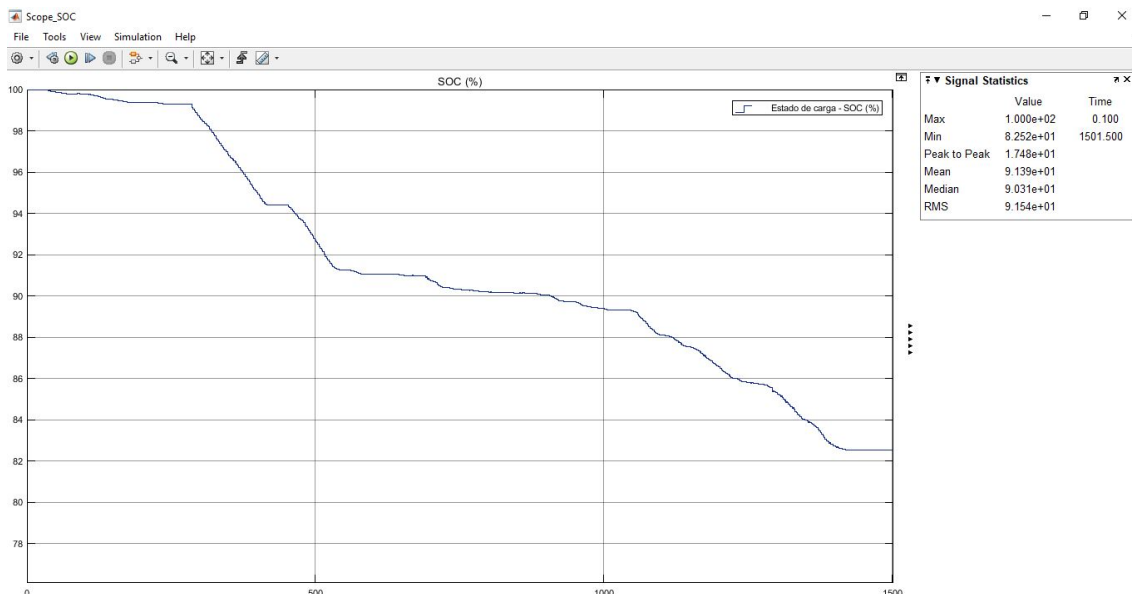


Figura 15.24: Ventana gráfica principal - Elección de visualizaciones - Estado de carga

15.6. Comparar vehículos

Con esta función el usuario podrá realizar una comparación de rendimiento entre dos vehículos en un circuito determinado. Cabe destacar que no es necesario simular un ciclo de conducción previamente. Para hallar la misma véase la figura 15.25.

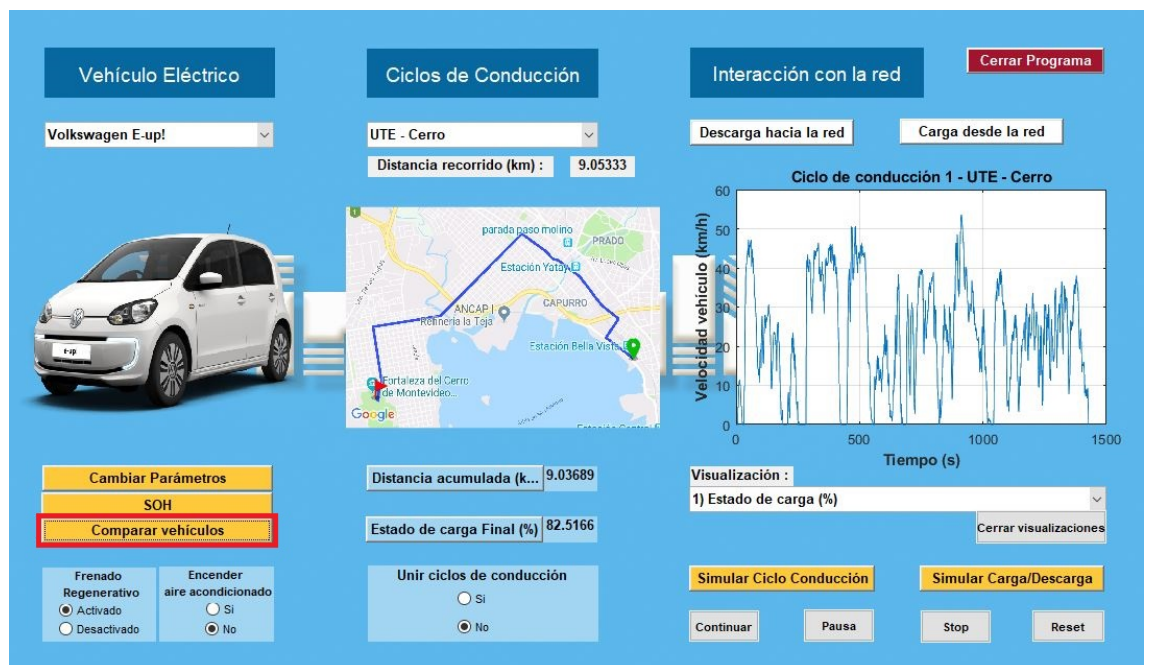


Figura 15.25: Ventana gráfica principal - Elección de visualizaciones - Estado de carga

Una vez seleccionada emergerá automáticamente la ventana gráfica principal. Para el uso apropiado de esta función el usuario deberá seleccionar los vehículos a comparar así como también el ciclo de conducción en el que serán comparados. Siempre que la opción sea ingresada con éxito aparecerá un tick verde dando esa indicación. Véase figura 15.26.

Comparación de Vehículos

Seleccione ciclo de conducción a

2) WLTP Clase 3 ✓

Atrás

Seleccione vehículos a

Vehículo 1

Renault Zoe ✓

Vehículo 2

Nissan Leaf ✓

Ver parámetros

Comparar

Seleccione parámetro :

Seleccionar...

Vehículo 1

SOC Inicial (%):

SOC Final (%):

Energía consumida (kWh):

Vehículo 2

SOC Inicial (%):

SOC Final (%):

Energía consumida (kWh):

Figura 15.26: Ventana gráfica principal - Comparar vehículos - Selección de ciclo y vehículos.

Previo a la comparación de los vehículos es posible verificar sus parámetros principales, así como también las características del ciclo elegido, para ello se debe seleccionar la opción “**Ver parámetros**”. Una nueva ventana gráfica aparecerá desplegando lo mencionado anteriormente. Véase figura 15.27.

15.6. Comparar vehículos

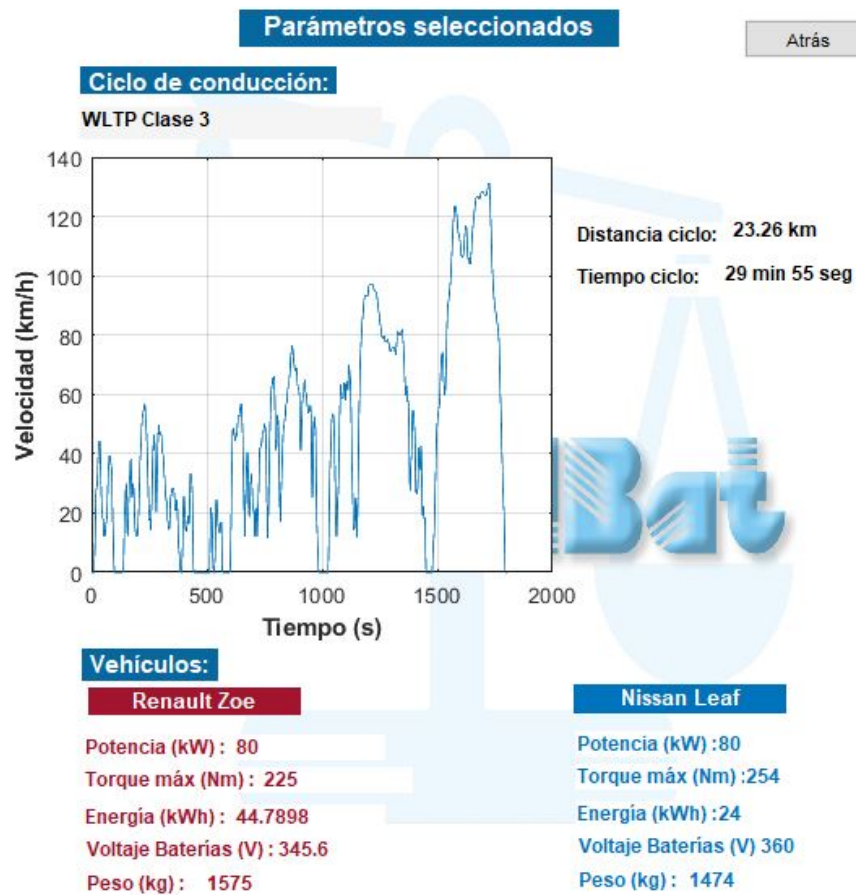


Figura 15.27: Ventana gráfica principal - Comparar vehículos - Ver parámetros.

Para cerrar la ventana basta con elegir la opción “**Atrás**” la cual volverá a la ventana gráfica principal de la función. Previo al comienzo de la comparación es necesario seleccionar el parámetro a visualizar de ambos vehículos. Los parámetros disponibles son:

- SOC (%)
- Energía Consumida (kWh)

Para realizar la comparación es necesario seleccionar la opción “**Comparar**”. Se llenarán automáticamente todos los campos y se desplegará el gráfico del parámetro elegido previamente. En caso querer desplegar otro parámetro en la visualización simplemente se cambia y se vuelve a comparar los vehículos. Véase figura 15.28.

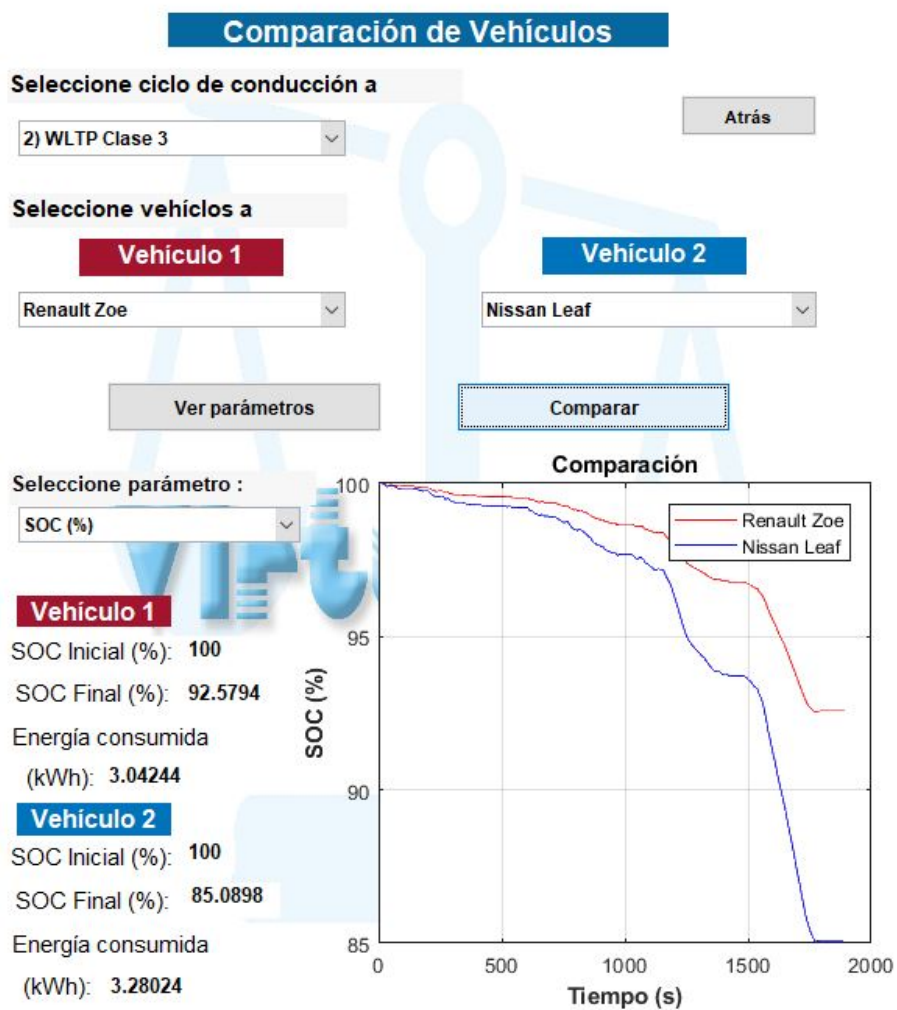


Figura 15.28: Ventana gráfica principal - Elección de visualizaciones - Estado de carga

Apéndice A

Infraestructura de recarga en Uruguay

En este apartado, se muestra como están distribuidos los SAVE en el país. El usuario puede encontrar esta información más detallada en la página web de movilidad eléctrica de UTE “<https://movilidad.ute.com.uy>”.

UTE se encarga del suministro de energía necesario para realizar la carga de los vehículos eléctricos en Uruguay. Actualmente se cuenta con un sistema de carga que está en expansión, en el cual el usuario tiene la posibilidad de ir a un centro de carga y realizar la misma a potencias de $7,4kW$, $22kW$ o $43kW$. Es decir, cargas en alterna de tipo estándar, semi rápida o rápida.

Por otro lado, está estipulado como una proyección a futuro, la implementación de una red de recarga súper rápida con SAVE que permitan cargar con corriente continua.

En la figura A.1, se puede ver como está distribuida la red de carga actualmente en Uruguay. Claramente se puede denotar que existe una ruta de carga que conecta el departamento de Montevideo con Artigas, donde mayoritariamente el circuito de carga se ubica en la zona Oeste del país.

Apéndice A. Infraestructura de recarga en Uruguay



Figura A.1: Red de carga en Uruguay.

Si se observa detalladamente la distribución de carga en Montevideo (ver figura A.2) se destaca que los centros de carga disponibles son los siguientes:

Ubicación	Potencia de suministro	Cantidad de SAVE
Belloni	43 kW	4
Golf	43 kW	4
Intendencia	43 kW	6
Palacio de la Luz	22 kW	1
Centro de capacitación Rondeau	43 kW	1
Parque Leguizamón	7,4 kW	2
Joanicó	43 kW	4

Tabla A.1: Tabla de centros de carga en Montevideo

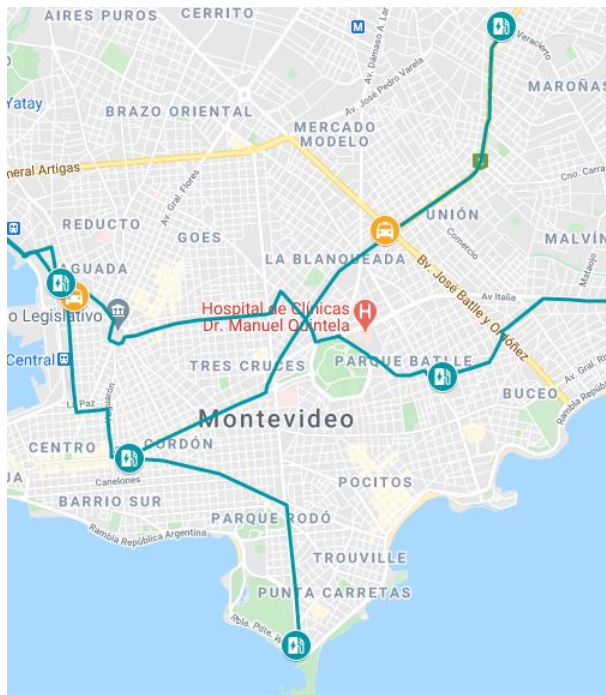


Figura A.2: Red de carga en Montevideo.

Finalmente se muestra el sistema de red de carga que está previsto para el país. En la figura A.3 se puede encontrar en verde la red de carga que actualmente no está instalada, la mayor parte de la misma una Montevideo con el Este de Uruguay.



Figura A.3: Red de carga prevista para Uruguay.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice B

Conversión de ciclo NEDC a ciclo WLTP

Como previamente fue detallado, para los vehículos que fueron creados antes del primero de Septiembre de 2018, fecha en la cual se impuso como obligatorio que el vehículo eléctrico tiene que ser homologado con el ciclo de conducción WLTP, no se cuenta con el dato de dicha autonomía brindado por el fabricante. Es por ello que se procede a realizar una aproximación que vincule el ciclo de conducción NEDC y el ciclo WLTP.

Según el estudio realizado en [71], se procede a convertir ambos ciclos a EPA, el cual es un ciclo de conducción que se utiliza en EEUU, el mismo es realizado por la Agencia de Protección del Medio Ambiente.

De este estudio se obtiene que la relación NEDC/EPA es de 1,43. Es decir, que para convertir del NEDC al EPA, se procede a dividir el consumo del NEDC entre 1,43 en donde el error es de 11 %.

A su vez, si se convierte del ciclo WLTP al EPA, es necesario dividir el consumo entre 1,12 donde el error en este caso es del 8 %.

Por lo tanto, en base a estas conversiones, se procede a mostrar la relación que se obtiene entre los ciclos NEDC y WLTP, resultando:

$$WLTP = NEDC * 0,783$$

Cabe destacar que este método es el que se utiliza en el presente proyecto para estimar la relación entre ambos ciclos de conducción. Así mismo, este tiene su cierto grado de error considerable, debido a que las conversiones al ciclo EPA realizadas previamente tienen error. De todas formas, esta relación se utilizará únicamente en el caso que la autonomía brindada por el fabricante no esté para el ciclo WLTP. Esto cada vez será menos utilizado ya que actualmente todos los vehículos deben contar con este dato.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice C

Comparativa económica entre vehículos eléctricos y a combustión

En el presente apartado se desarrollara una comparativa económica entre los vehículo eléctricos y a combustión. Para ello se realizará un estudio comparativo entre el costo que conlleva utilizar un vehículo eléctrico y un vehículo convencional en la ciudad. Para ello se tendrá en cuenta el precio de ambos tipos de vehículos desde fábrica, así como también los servicios por mantenimiento que se requieran.

El objetivo de este apartado es mostrarle a un usuario que tenga incertidumbre para decidirse por un coche eléctrico o uno convencional, un análisis económico comparativo. Para ello es necesario comenzar definiendo con qué costos tarifarios se trabajará (los mismos son fijados por UTE en Uruguay) y, por otro lado, establecer el costo del combustible el cual es fijado por ANCAP.



Figura C.1: Figura representativa de la confrontación entre los vehículos eléctricos y a combustión.

Apéndice C. Comparativa económica entre vehículos eléctricos y a combustión

C.1. Tarifa para vehículos eléctricos

Como fue visto en el capítulo 9, más precisamente en la tabla 9.4 descripta para las implementaciones realizadas del trayecto dinámico, se puede observar los distintos tipos de tarifas que UTE establece. En este caso se establecerá que para la tarifa Triple Horario, se considera como suposición y punto de partida para realizar la comparación que la carga del coche eléctrico se realice en la franja de horario Valle, la cual establece que si la carga del vehículo se realiza entre las 00:00 horas y las 07:00 horas, el precio de energía por kWh será de 1.994 \$/kWh.

C.2. Costo del combustible

Si se evalúan los costos del combustible en Uruguay, los cuales son establecidos por la Administración Nacional de Combustibles Alcohol y Portland (ANCAP) y fijados por el Poder Ejecutivo, es necesario analizar cuales son los precios de interés para nuestra comparativa. Es por ello que se observan los dos tipos de combustible que pueden utilizar los vehículos con los que se realizará el estudio comparativo. A continuación se presenta un listado con los precios de dichos combustibles:

- **Gasolina Super 95 SP:** \$54.95 [72]
- **Gasolina PREMIUM 97 SP:** \$57.01 [73]

Se elegirá la Gasolina Super 95 SP ya que es la más económica de las dos opciones y como previamente se optó por elegir la tarifa eléctrica de costo más beneficioso para el usuario, se buscará realizar la comparativa entre ambos medios de locomoción bajo las mismas suposiciones.

C.3. Costo de adquisición de ambos vehículos

En esta sección se presenta la comparativa del costo que un usuario tiene para adquirir ambos tipos de vehículos, particularmente se expondrá la comparación entre el Renault Kangoo ZE Maxi 33 kWh, contra el Renault Kangoo a combustión del año 2020.

En la siguiente tabla se exponen los precios referenciales que se encontraron para ambos modelos:

Vehículo	Costo (USD)
Renault Kangoo ZE 33 kWh	34.490 [74]
Renault Kangoo	20.990 [75]

Tabla C.1: Tabla comparativa costo de fábrica Renault Kangoo ZE 33 kWh vs Renault Kangoo

Como es claro apreciar, el costo de un vehículo eléctrico al compararlo con su par convencional es notoriamente superior. Por lo que es claro comprender que un usuario a primer impacto no se decida por dichos vehículos.

C.4. Incentivo para la movilidad eléctrica en Uruguay

Sin embargo, si se realiza un análisis más profundo, en donde se consideran otros gastos tales como rendimiento, mantenimiento y beneficios que brinda el país como incentivo para que el usuario prefiera por esta opción. Es por este motivo que en las siguientes secciones se abarcan estos temas.

C.4. Incentivo para la movilidad eléctrica en Uruguay

Hoy en día en Uruguay hay varios incentivos que impulsan la incorporación de energéticos alternativos y de la movilidad eléctrica. Esto se debe a que se trata de reducir la emisión de gases contaminantes como consecuencia directa de la combustión de combustibles fósiles y la contaminación sonora.

El país cuenta con condiciones favorables para el desarrollo del transporte eléctrico a que, la capacidad instalada para la generación de energía eléctrica y eólica en la noche, es suficiente para satisfacer el aumento de demanda de vehículos eléctricos que se estima habrá en un futuro. [76]

Por lo tanto, en el siguiente listado se mencionarán los incentivos más importantes que se destacan en Uruguay:

- Reducción de Impuesto Específico Interno (IMESI) (Decreto 246/012) para híbridos y eléctricos: Vehículos de pasajeros eléctricos: IMESI 5,75 % frente a 115 % vehículos a gasoil y gasolina entre un 23 a 46 % Transporte utilitario eléctrico: IMESI 2,3 %, menor que todos los otros utilitarios.
- Ley de promoción de inversiones (Decreto 02/12): La Ley otorga beneficios a proyectos cuya inversión genere beneficios en diferentes sectores. En particular, si la empresa presenta un proyecto donde hay inversión en vehículos utilitarios eléctricos la misma se reduce desde un 30 % hasta más de un 70 % a través de la exoneración de IRAE. En los casos más auspiciosos el retorno del proyecto supera el 40 %.
- Certificados de eficiencia energética: Instrumento económico del MIEM por las medidas de eficiencia energética realizadas. En particular, los vehículos eléctricos se premian más. Beneficio económico: de 3 % a 30 % de la inversión.
- Exoneración de tasa global arancelaria (TGA): Autos y transporte de mercancías solo con motor eléctrico: 0 % TGA. Uruguay no tiene producción nacional de vehículos eléctricos por lo que se promovió la importación con la reducción de 23 % a 0 % de los aranceles de importación.
- Descuento comercial de UTE: Cambio de la potencia contratada del suministro sin costo. Tarifa en valle (0 a 7 am) al 50 % en las estaciones de recarga de UTE. Tarifas mediano consumidor y tarifa doble residencial al 50 % en horario fuera de punta (fuera de 6 a 10 pm).
- Prueba gratuita de utilitarios eléctricos del Proyecto MOVÉS: El Proyecto MOVÉS promociona la prueba gratuita de vehículos utilitarios eléctricos para empresas que cuenten con operaciones de reparto urbanas. La prueba

Apéndice C. Comparativa económica entre vehículos eléctricos y a combustión

sin costo tiene un mes de duración y se instrumentará a través de empresas alquiladoras.

- Subsidio para la sustitución de ómnibus diésel por ómnibus eléctricos: El Poder Ejecutivo reglamentó el subsidio para la sustitución de ómnibus diésel por ómnibus con motorización eléctrica. Esta iniciativa es parte de las políticas impulsadas por el Estado para la promoción de la movilidad eléctrica y la mejora del servicio del transporte público de pasajeros que brindan servicios regulares en todo el país.

C.5. Mantenimiento en vehículos eléctricos

Cuando se habla de los beneficios de los coches eléctricos, el bajo coste de mantenimiento siempre se cita como una de las principales ventajas para el usuario. Esto es debido a que los elementos básicos que componen la tracción eléctrica como el propio motor eléctrico no necesitan ningún tipo de mantenimiento. A su vez, en un coche eléctrico, las temperaturas, las vibraciones y los elementos en movimiento se reducen a la mínima expresión y como consecuencia directa, también lo hace el mantenimiento.

Al igual que ocurre con los coches de combustión, el mantenimiento de un coche eléctrico está programado por los propios fabricantes en los manuales del vehículo. A priori, elementos como neumáticos, la batería de 12V o las suspensiones están sujetos a un desgaste similar que en los coches de combustión y es algo que también se debe tener en cuenta para realizar un mantenimiento en los coches eléctricos. La gran excepción son los frenos, que gracias al frenado regenerativo tienen un uso menos intensivo, alargando la vida útil de discos y pastillas.

A su vez, otra de las grandes ventajas que se encuentran en cuanto al mantenimiento es que, a diferencia de los vehículos a combustión, al tener un motor eléctrico, éste no requiere de cambios de aceite o filtros, ni correas de distribución. Por otro lado, las baterías de los coches eléctricos no requieren de mantenimiento alguno (si se trata de las baterías de Litio). Pero lo que sí hay que tener en cuenta es su degradación como previamente se estudió y por lo tanto su vida útil.

Por lo tanto, si se realiza una comparativa entre los gastos que se generan por mantenimiento para los vehículos eléctricos y a combustión, como es claro deducir, el costo de mantenimiento para los vehículos eléctricos será menor. Según estudios realizados se puede estimar un promedio del gasto de mantenimiento anual para ambos tipos. Según las notas publicadas en Xataka [77] y [78], se realiza un estudio comparativo tanto para el Volkswagen e-Golf y su par convencional, como para el Peugeot e-208 y el mismo a combustión. En ambos estudios se prevé que se realicen 20.000 km al año, durante 10 años. Esto genera una diferencia de costos en mantenimiento, donde el coche eléctrico supone un ahorro de 223 euros anuales (19 mensuales) respecto al de gasolina para el Volkswagen e-Golf. En cuanto al Peugeot e-208, bajo las mismas condiciones se concluye que el ahorro en 10 años en mantenimiento es de aproximadamente 2.000 euros, es decir 200 euros por año.

C.6. Comparación de consumos

Dada la similitud que existe entre el ahorro de costos por mantenimiento para ambos vehículos, se decide considerar como referencia el precio de 2.000 euros en 10 años, ya que es el resultado menor de los dos estudios.

C.6. Comparación de consumos

En esta sección se expone una de las diferencias más importantes que se puede encontrar en cuanto a la comparativa económica entre los vehículos eléctricos y los vehículos convencionales. La misma, es la diferencia en la relación consumo, costo para cada tipo, ya que se sabe que los motores eléctricos son más eficientes energéticamente que los motores a combustión. Para ello se expone la comparativa de consumo para el Renault Kangoo ZE Maxi y su par convencional.

Para comenzar el análisis se simula el ciclo de conducción precargado en el software “Montevideo Completo con el Renault Kangoo ZE. Del cual se recaba que el consumo para dicho trayecto es de 8.356 kWh, por lo que el rendimiento en ciudad es de 0.197 kWh/km ($\frac{8,356kWh}{42,32km}$). Por otro lado se conoce el rendimiento en ciudad para la kangoo convencional, el mismo es de 14.2 km/litro [79]. Por lo que, a partir de estos datos se realiza la tabla C.2 para la cual se considera que se recorrerán 200.000 kilómetros en ciudad con cada vehículo.

Vehículo	Rendimiento Ciudad	Kilómetros Realizados	Consumo Total	Tarifa	Costo Total
Renault Kangoo ZE Maxi 33 kWh	0.197 kWh/km	200.000 km	39.400 kWh	1.994 \$/kWh	\$78.563,6
Renault Kangoo	0.0704 L/km	200.000 km	14.085 litros	54.95 \$/L	\$773.943,67

Tabla C.2: Tabla comparativa de gastos por consumo del vehículo eléctrico vs vehículo a combustión.

Como se puede apreciar, el gasto para un plazo aproximado de 10 años, en el cual se estimó que se realiza 20.000 kilómetros por año. Para un vehículo eléctrico el mismo es 10 veces menor que para su par convencional. Esto sin dudas es una de las mayores ventajas que se puede encontrar entre ambos vehículos.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Referencias

- [1] Agustín Mosto Silvestri Jonathan Acosta Canavese, Alejandro Gigena Fernández. Baterías en vehículos eléctricos conectados a la red. *Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República*, 2019. <https://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2019/AGM19/>.
- [2] Autocasión. En 2023 prohibirán los coches de combustión en las ciudades. 2020. <https://www.autocasion.com/actualidad/noticias/prohibiran-coches-combustion-ciudades-50-000-habitantes-trafico-restringido>.
- [3] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Guía del vehículo eléctrico. <https://www.icmm.csic.es/es/divulgacion/documentos/Guia-del-Vehiculo-Elctrico-2009-fenercom.pdf?id=127>.
- [4] Motor Pasión. “el motor de combustión es el más eficiente hoy”: Falso. <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/el-motor-de-combustion-es-el-mas-eficiente-hoy-falso>.
- [5] Union of Concerned Scientists. Carros, camiones, buses y la contaminación del aire. 2017. <https://es.ucsusa.org/resources/carros-camiones-buses-contaminacion>.
- [6] Annette von Jouanne Alexandre Yokochi Yu Miao, Patrick Hynan. Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *energies*, 1(1):1–20, 2019. https://www.researchgate.net/publication/331904470_Current_Li-Ion_Battery_Technologies_in_Electric_Vehicles_and_Opportunities_for_Advancements.
- [7] Ovacen. 7 gráficas para entender la evolución del coche eléctrico. 2019. <https://ovacen.com/evolucion-coche-electrico/>.
- [8] Álvaro Iniesta López. Vehículo eléctrico: ¿una opción de futuro en los sistemas eléctricos? 2015. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23352/TFG_Alvaro_Iniesta_Lopez.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [9] HB híbridos y eléctricos. Las ventas mundiales de vehículos eléctricos aumentaron un 64% en 2018. 2018. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/sector/ventas-mundiales-vehiculos-electricos-aumentaron-64-2018/>

Referencias

- 20190404075652026763.html#:~:text=Las%20ventas%20mundiales%20de%20veh%C3%ADculos%20el%C3%A9ctricos%20aumentaron%20un%2064%25%20en%202018,-Impulsado%20sobre%20todo&text=Las%20ventas%20de%20veh%C3%ADculos%20enchufables,ligeros%20del%202%2C%25..
- [10] iea.org. Perspectiva global de vehículos eléctricos 2020. 2020. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>.
- [11] Fundacion endesa. La emobility y los coches eléctricos. <https://www.fundacionendesa.org/es/recursos/a201908-emobility-coches-electricos>.
- [12] EcoInventos. Coche eléctrico: ¿conoces las partes que lo componen? <https://ecoinventos.com/coche-electrico-partes-que-lo-componen/>.
- [13] Qingkai Yang Jie Fan Fengchun Sun Dietmar Goehlich Huiming Gong, Yuan Zou. Generation of a driving cycle for battery electric vehicles a case study of beijing. *Energy*, 150:901–912, 2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218303207>.
- [14] European Commission Institute for Environment and Sustainability. Regulated emissions of a euro 5 passenger car measured over different driving cycles. <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2010/wp29grpe/WLTP-DHC-04-03e.pdf>.
- [15] Wikipedia. Wltp. <https://es.wikipedia.org/wiki/WLTP>.
- [16] Geoffrey M. Lewis Gregory A. Keoleian Anna Stefanopoulou Maxwell Woody, Maryam Arbabzadeh. Strategies to limit degradation and maximize li-ion battery service lifetime - critical review and guidance for stakeholders. *Journal of Energy Storage*, 28(1):1–15, 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X19314227>.
- [17] Battery University. Bu-301a: Types of battery cells. *Battery University*, 2019. https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells#:~:text=Asian%20cell%20manufacturers%20anticipate%20cost,21700%2C%20prismatic%20and%20pouch%20cells..
- [18] UNIVERSIDAD DE CUENCA Facultad de Ingeniería Carrera de Ingeniería Eléctrica. Análisis y modelado de baterías de ion litio paravehículos eléctricos. 2016. <https://docplayer.es/78638072-Universidad-de-cuenca-facultad-de-ingenieria-carrera-de-ingenieria-electrica.html>.
- [19] Medium. Advantages of pouch cell battery, trend and opportunities. <https://medium.com/battery-lab/advantages-of-pouch-cell-battery-trend-and-opportunities-d08a5f0c6804>.

- [20] W. Zhang C.V. Nielsen M.F.R. Zwicker, M. Moghadam. Automotive battery pack manufacturing –a review of battery to tab joining. *Journal of Advanced Joining Processes*, 1, 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666330920300157>.
- [21] Carolina Morente Fernández. Análisis y modelado del comportamiento de baterías para vehículos eléctricos. 2015. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23050/TFG_Carolina_Morente_Fernandez.pdf.
- [22] Alfredo Ursúa Pablo Sanchis Alberto Berrueta, Andoni Urtasun. A comprehensive model for lithium-ion batteries: From the physical principles to an electrical model. *Energy*, 144:286–300, 2018. https://www.researchgate.net/publication/321582278_A_comprehensive_model_for_lithium-ion_batteries_From_the_physical_principles_to_an_electrical_model.
- [23] Energizer. Technical bulletin - battery internal resistance. Version 1.1.0, 2005. <https://data.energizer.com/PDFs/BatteryIR.pdf>.
- [24] Ashok K. Singal. The internal resistance of a battery – a physical perspective. 2013. https://www.researchgate.net/publication/256070393_The_Internal_Resistance_of_a_Battery.
- [25] Battery University. How does rising internal resistance affect performance? https://batteryuniversity.com/learn/article/rising_internal_resistance.
- [26] Peter Keil. Aging of lithium-ion batteries in electric vehicles battery capacity and state of charge estimation. *Technische Universität München*, 2017. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1355829/file.pdf>.
- [27] Michael Heck Stephan Lux Matthias Vetter Julius Schmitt, Arpit Maheshwari. Impedance change and capacity fade of lithium nickel manganese cobalt oxide-based batteries during calendar aging. *a Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*, 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877531730397X>.
- [28] Andrzej LEBKOWSK. Temperature, overcharge and short-circuit studies of batteries used in electric vehicles. *Gdynia Maritime University*, 2017. https://www.researchgate.net/publication/316171277_Temperature_Overcharge_and_Short-Circuit_Studies_of_Batteries_used_in_Electric_Vehicles.
- [29] Yun Bao Dian Wang and Jianjun Shi. Online internal resistance measurement application in lithium ion battery capacity and state of charge estimation. *Department of Physics, Donghua University*, 2017. https://www.researchgate.net/publication/324799192_Online_Internal_Resistance_Measurement_Application_in_Lithium_Ion_Battery_Capacity_and_State_of_Charge_Estimation.

Referencias

- [30] Mattia Ricco Maciej Swierczynski Daniel-Ioan Stroe Jinhao Meng, Guangzhao Luo and Remus Teodorescu. Overview of lithium-ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles. *applied sciences*, 2018. <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/5/659/htm>.
- [31] Aitor Conde Velasco. Desarrollo y validación de un modelo de baterías de ión-litio. aplicación al estudio de su envejecimiento, ligado al tipo de recarga. 2018. http://oa.upm.es/52762/1/TFG_AITOR_CONDE_VELASCO.pdf.
- [32] Jaume Martínez Bertran. Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas. 2017. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/104855/TFG_Jaume_Martinez_Metodos_de_estimacion_del_estado_de_carga_de_baterias_electroquimicas.pdf.
- [33] Farukh Abbas Lei Sang-Muhammad Umair Sahid Houjun Tang Salman Habib, Muhammad Mansoor Khan. A comprehensive study of implemented international standards, technical challenges, impacts and prospects for electric vehicles. *IEEE Access*, 2018. <https://www.icmm.csic.es/es/divulgacion/documentos/Guia-del-Vehiculo-Elctrico-2009-fenercom.pdf?id=127>.
- [34] UTE. Carga de vehículos. 2020. <https://movilidad.ute.com.uy/carga.html>.
- [35] Javier Logroño Diéguez. Cargador de batería para vehículos. 2017. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/112391/TFG%20CARGADOR%20DE%20BATER%3%8DA%20PARA%20VEH%3%8DCULOS%20-%20JAVIER%20LOGRO%3%910%20DI%3%89GUEZ.pdf>.
- [36] Sébastien Grolleau Mathias Gérard Frédéric Suard Delphine Riu Anthony Barré, Benjamin Deguilhem. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources*, 241(2):680–689, 2013. <https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-01791260/document>.
- [37] Amit Patra Arijit Guha, Vaisakh K V. remaining useful life estimation of lithium-ion batteries based on a new capacity degradation model”. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia - Pacific*, 1(1):555–560, 2016. https://www.researchgate.net/publication/305674950_Remaining_useful_life_estimation_of_lithium-ion_batteries_based_on_a_new_capacity_degradation_model.
- [38] Paul Brooker Matthieu Dubarry, Nan Qin. Calendar aging of commercial lithium cells of different chemistries –a review. *Science Direct*, 1(1):106–113, 2018. https://www.researchgate.net/publication/325738076_Calendar_Aging_of_commercial_Li-ion_cells_of_different_chemistries_-_A_review.

- [39] F. Castelli-Dezza M. Mauri M. Rossi G. Marchegiani E. Rovelli M. Scarfogliero, S. Carmeli. Lithium-ion batteries for electric vehicles: A review on aging models for vehicle-to-grid services. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8493211>.
- [40] L. Skogström-T. Laurila M. Nisula K. Vuorilehto K. Jalkanen, J. Karppinen. Cycle aging of commercial nmc/graphite pouch cells at different temperatures. *Applied Energy*, 154(1):160–172, 2015. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261915005735>.
- [41] Daniel Ioan-Stroe Maciej Swierczynski Joris Jaguemont Shovon Goutam Noshin Omar Joeri Van Mierlo Peter Van Den Bossche Joris de Hoog, Jean-Marc Timmermans. Combined cycling and calendar capacity fade modeling of a nickel-manganese-cobalt oxide cell with real-life profile validation. *Applied Energy*, 200(1):47–61, 2017. <https://daneshyari.com/article/preview/4916142.pdf>.
- [42] Canalmotor. Qué es el freno regenerativo y por qué es más eficiente. 2020. <https://www.motor.mapfre.es/coches/noticias-coches/que-es-freno-regenerativo-por-que-mas-eficiente/>.
- [43] Ernesto Posada. El freno regenerativo. 2019. <https://www.excelenciasdelmotor.com/autos/el-freno-regenerativo>.
- [44] Hailin Wang Jiageng Rua-Nong Zhang Boyi Xiao, Huazhong Lu. Enhanced regenerative braking strategies for electric vehicles: Dynamic performance and potential analysis. *energies*, 2017. <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/el-motor-de-combustion-es-el-mas-eficiente-hoy-falso>.
- [45] G.D Gan C.K Leong-Z.Y Phuan B.K Cheah. K.W Chew Member IEEE M.K Yoong, Y.H Gan. *Studies of regenerative braking in electric vehicle*, 2010. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5686984>.
- [46] Divyanshu Parashar. Seminar on regenerative braking. 2014.
- [47] Matthew Brown. Regenerative braking efficiency. *Stanford University*, 2016. <http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/brown1/>.
- [48] Carlos Valdivia Miranda. Diseño de un bms para baterías de tecnología li-ion. 2018. <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/81147/7/cvaldiviamTFM0618memoria.pdf>.
- [49] Gabriel Huerta Illera. Gestor de carga de baterías (bms). 2014. http://riubu.ubu.es/bitstream/10259/3539/1/Huerta_Illera.pdf.
- [50] ExoSolar. Baterías de ion – litio. usos y riesgos. 2019. <https://exosolar.es/baterias-de-ion-litio-usos-y-riesgos/>.

Referencias

- [51] Hyun Jae Kim Tae Jin Kim, Byeng D. Youn. Battery pack temperature estimation model for evs and its semi-transient case study. 2013. <https://www.aidic.it/cet/13/33/160.pdf>.
- [52] MyTechZone. Experimental test campaign on a battery electric vehicle: On-road test results (part 2). 2015. https://www.researchgate.net/publication/274315885_Experimental_Test_Campaign_on_a_Battery_Electric_Vehicle_Laboratory_Test_Results_Part_1.
- [53] Google. Google maps apis. 2020. <https://cloud.google.com/maps-platform/products?hl=es>.
- [54] UTE. Pliego tarifario de ute 2020. 2020. <https://portal.ute.com.uy/sites/default/files/docs/Pliego%20Tarifario%20Vigente.pdf>.
- [55] Edinson Jordano Tirado Ortega Juan Andrés Alarcón Ochoa. Diseño y construcción del sistema de refrigeración para la batería de un vehículo fórmula sae eléctrico. 2017. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13641/1/UPS-CT006932.pdf>.
- [56] DIRECCION DE CLIMATOLOGIA Y DOCUMENTACION DIRECCIÓN NACIONAL DE METEOROLOGÍA. El verano. 2014. <https://www.inumet.gub.uy/reportes/dcd/verano.pdf>.
- [57] Reza Fakhrai. Designing battery thermal management systems(btms) for cylindrical lithium-ion battery modules using cfd. 2019. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1290856/FULLTEXT01.pdf>.
- [58] Johnson Electric. Battery cooling fan module. <https://www.yumpu.com/en/document/read/13494320/battery-cooling-fan-module-cfm-ev-johnson-electric>.
- [59] Thomas Stuart Ahmad Pesaran, Andreas Vlahinos. Cooling and preheating of batteries in hybrid electric vehicles. 2003. https://www.researchgate.net/publication/228780594_Cooling_and_preheating_of_batteries_in_hybrid_electric_vehicles.
- [60] spanish car lithium battery. Baterías del vehículo eléctrico. <http://spanish.carlithiumbattery.com/sale-12700798-high-energy-density-58-4v-64ah-nmc-battery-electric-vehicle-batteries-for.html>.
- [61] wikipedia. Renault zoe. 2018. [https://en.wikipedia.org/wiki/Renault_Zoe#:~:text=The%20Zoes%20produced%20until%20June,21%20km%20\(130%20mi\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Renault_Zoe#:~:text=The%20Zoes%20produced%20until%20June,21%20km%20(130%20mi)).
- [62] Google Play. Speed logger. https://play.google.com/store/apps/details?id=com.tp77.SpeedLoggerAd&hl=es_419.

- [63] Google Play. Speed bot. https://play.google.com/store/apps/details?id=com.vialsoft.speedbot_gps_obd_speedometer&hl=en_US.
- [64] Andreas; Martinenas Sergejus; Sørensen Thomas Meier Kiildsen, Andreas; Thingvad. Efficiency test method for electric vehicle chargers. 2016. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/137328554/efficiency_paper.pdf.
- [65] Renault. Datos técnicos renault knagoo 33 kwh. https://cdn.group.renault.com/ren/ar/catalogos/kangoo-ze/_ebrochure.pdf.asset.pdf/1563810949443.pdf.
- [66] Foro coches eléctricos. Comparativa garantía de la batería de los diferentes fabricantes de coches eléctricos. <https://forococheselectricos.com/2016/12/comparativa-garantia-de-la-bateria-de-los-diferentes-fabricantes-de-coches-electricos.html>.
- [67] BMW. Technical specifications. bmw i3 (120 ah). - bmw press. <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/attachment/T0284828EN/415571>.
- [68] Battery University. Bu-1003: Electric vehicle (ev). https://batteryuniversity.com/learn/article/electric_vehicle_ev#:~:text=The%20makers%20of%20Nissan%20Leaf,per%20cell%20or%20248Wh%2Fkg.
- [69] BYD. T3 - brochure. https://sg.byd.com/wp-content/uploads/2018/12/T3-Brochure_updated.pdf.
- [70] Autoblog. Byd -t3. <https://www.autoblog.com.uy/2019/08/lanzamiento-byd-t3-y-m3.html>.
- [71] INSIDEEVs. Here's how to calculate conflicting ev range test cycles: Epa, wltc, nedc. <https://insideevs.com/features/343231/heres-how-to-calculate-conflicting-ev-range-test-cycles-epa-wltc-nedc/>.
- [72] ANCAP. Super - 95. 2020. <https://www.ancap.com.uy/1636/1/super-95.html>.
- [73] ANCAP. Premium - 97. 2020. <https://www.ancap.com.uy/1637/1/premium-97.html>.
- [74] Autoblog. Lanzamiento: Renault kangoo maxi z.e. 2020. <https://www.autoblog.com.uy/2020/08/lanzamiento-renault-kangoo-maxi-ze.html>.
- [75] Mercado libre. Renault kangoo 0km 5 y 8 pasajeros. 2020. https://auto.mercadolibre.com.uy/MLU-460463298-renault-kangoo-0km-5-y-8-pasajeros-_JM#position=1&type=item&tracking_id=56d91dc7-caf7-4d39-9897-4f42de4dbebb.

Referencias

- [76] Energía y Minería Ministerio de Industria. Movilidad eléctrica. 2020. <https://www.miem.gub.uy/energia/movilidad-electrica>.
- [77] Xataka. ¿es realmente más barato el mantenimiento de un coche eléctrico? hacemos los números. 2020. <https://www.xataka.com/vehiculos/realmente-barato-mantenimiento-coche-electrico-hacemos-numeros>.
- [78] Xataka. ¿merece la pena el coche eléctrico? aquí tienes una calculadora para comprobarlo. 2020. <https://www.xataka.com/automovil/merece-pena-coche-electrico-aqui-tienes-calculadora-para-comprobarlo-1>.
- [79] Autocosmos. Especificaciones técnicas del renault kangoo intens (2020). <https://www.autocosmos.com.mx/catalogo/2020/renault/kangoo/intens/166701>.

Índice de tablas

3.1. Características principales del ciclo NEDC	14
3.2. Características principales de los ciclos WLTP	16
3.3. Tipos de química más utilizadas en el mercado [16].	18
5.1. Discriminación de los distintos modos de carga que se pueden aplicar en un vehículo según potencia [34].	37
9.1. Degradación de la resistencia interna de una celda del tipo 18650 NCA según el número de ciclos de carga.	58
9.2. Aumento porcentual de la resistencia interna de una celda del tipo 18650 NMC según degradación según días de almacenamiento. . .	59
9.3. Consumos y rendimientos promedio por vehículo, calculados a partir de la simulación del ciclo Montevideo completo.	77
9.4. Tarifas eléctricas ofrecidas por UTE según modo contratado. . . .	78
11.1. Comparación de los resultados obtenidos con el Renault ZOE 22 kWh	99
11.2. Tabla comparativa de autonomía de fábrica y autonomía del software para los distintos modelos de vehículos cargados en el software.	100
11.3. Comparativas de datos simulados con los límites impuestos por la garantía para la validación del cálculo del SOH.	102
11.4. Características de los vehículos a estudio para validar la implementación del vehículo genérico.	103
11.5. Comparativa entre autonomías de fabricantes y autonomías obtenidas a partir del software * Valor convertido a partir de la autonomía en ciclo NEDC. Véase B	103
11.6. Comparativa entre consumos de distintos ciclos de conducción y vehículos según simulación de perfiles de velocidad y la herramienta <i>Trayecto Dinámico</i>	104
12.1. Influencia en el estado de salud de la batería al alterar el tipo de carga realizado.	109
A.1. Tabla de centros de carga en Montevideo	146
C.1. Tabla comparativa costo de fábrica Renault Kangoo ZE 33 kWh vs Renault Kangoo	152

Índice de tablas

C.2. Tabla comparativa de gastos por consumo del vehículo eléctrico vs vehículo a combustión.	155
--	-----

Índice de figuras

2.1. Esquema de funcionamiento de un vehículo híbrido [3]	7
2.2. Evolución de la autonomía de los vehículos eléctricos en millas [7].	8
2.3. Evolución anual del número de puntos de carga accesibles en Europa [7].	9
2.4. Evolución de las ventas anuales de vehículos eléctricos en el mundo [9]	10
3.1. Diagrama esquemático de los componentes eléctricos del VE [11] .	11
3.2. Perfil de velocidades en función del tiempo - Ciclo NEDC [14]. . .	13
3.3. Perfil de velocidades en función del tiempo - Ciclo WLTP Clase 1 [15].	15
3.4. Perfil de velocidades en función del tiempo - Ciclo WLTP Clase 2 [15].	15
3.5. Perfil de velocidades en función del tiempo - Ciclo WLTP Clase 3 [15].	16
3.6. Representación del proceso de oxidación reducción en la descarga de batería de Litio [16].	17
3.7. Comparación entre las distintas químicas de celda utilizadas en vehículos eléctricos según energía específica, potencia específica, seguridad, rendimiento, tiempo de vida y costo [6].	18
3.8. Caracterización comercial de una celda cilíndrica 18650 y 21700 a partir de sus dimensiones [17].	20
3.9. Evolución en la producción de celdas cilíndricas a través de los años [17].	21
3.10. Componentes de una celda prismática [17].	21
3.11. Componentes de una celda laminada (Pouch) [18]	22
3.12. Estructura de pack de celdas con implementación en dos tipos (a) prismáticas y (b) cilíndricas [20].	23
4.1. Analogía del impacto del aumento de la resistencia interna en baterías de Litio [25]	28
4.2. Impacto de la degradación por ciclado de la resistencia interna en la eficiencia energética para ciclos de carga/descarga a distintos DoD NCA.	29
4.3. Degradación de la resistencia interna según edad para baterías cilíndricas 18650 con química NMC bajo condiciones definidas de almacenamiento [27].	30
4.4. Dependencia de la resistencia interna según temperatura para baterías a base de litio (LiFePO ₄ , Li-PO, Li-Ion) y plomo-ácido [28].	31

Índice de figuras

4.5. Influencia del estado de carga de la batería (SOC) en el valor de la resistencia interna [29].	32
4.6. Modelo de resistencia interna para celdas a base de litio.	33
4.7. Modelo eléctrico equivalente de pack de baterías.	34
5.1. Estrategia CC-CV de recarga de baterías de vehículos eléctricos [33]	36
5.2. Pérdidas de capacidad según variación en la velocidad de carga [31].	38
6.1. Efecto de pérdida de capacidad en baterías.	40
6.2. Efecto del SOC y la temperatura en la pérdida de capacidad para el almacenamiento de baterías de distintas químicas. [26]	41
6.3. Efecto de la temperatura en la pérdida de capacidad para baterías con química NMC durante el ciclado.	42
6.4. Efecto del DoD en la pérdida de capacidad para baterías NMC durante el ciclado.	42
7.1. Contribución al frenado según nivel de accionamiento del pedal de freno [44].	46
7.2. Esquemático del flujo de potencia en condiciones de aceleración del vehículo.	47
7.3. Esquemático del flujo de potencia en condiciones de funcionamiento del frenado regenerativo.	47
8.1. Zona de operación segura para baterías Ión-Litio [48].	51
8.2. Área de operación segura para una celda de la química LFP [48]. .	51
8.3. Factores limitantes de la corriente de carga según temperatura y SOC	53
8.4. Factores limitantes de la corriente de descarga según temperatura y SOC	54
8.5. Ensayo para determinar el coeficiente de transferencia de calor de una cara de la batería.	56
9.1. Bloque de caracterización de la resistencia interna influenciada por la edad, ciclos de batería, SOC y temperatura de la batería implementado en Simulink.	60
9.2. Diagrama del funcionamiento del bloque de degradación de la resistencia interna de la batería	61
9.3. Diagrama de flujo del algoritmo de estimación del SOH de la batería para un valor límite $SOH = 80\%$	63
9.4. Implementación en software.	66
9.5. Simulación de la energía consumida en ciclo WLTP clase 2 Nissan Leaf.	67
9.6. Ajuste de limitación para la Potencia de frenado regenerativo. . . .	68
9.7. Torque máximo para la Potencia de frenado regenerativo limitada.	69
9.8. Potencia de frenado regenerativo para Nissan Leaf.	70
9.9. Energía regenerada para Nissan Leaf WLTP clase 2.	70
9.10. Diagrama de bloques de Simulink que modela el efecto Joule en batería.	79

9.11. Diagrama de bloques de Simulink que modela la transferencia de calor por convección en batería.	80
9.12. Diagrama de bloques implementado en Simulink para la refrigeración forzada en batería.	82
9.13. Implementación de bloques en Simulink para modelo térmico en la batería.	83
9.14. Diagrama de bloques de Simulink para la variación de temperatura de la batería.	84
9.15. Factor de limitante máxima de la corriente de descarga para temperaturas fuera de la SOA	85
9.16. Limitación de la Potencia máxima de la batería por corriente y temperatura.	86
10.1. Circuito en ruta, inicio Palacio de la luz - fin Central Térmica, punta del tigre.	89
10.2. Curva de carga Renault ZOE.	91
11.1. Perfil de velocidad del trayecto de ida en ruta.	95
11.2. Energía consumida en el trayecto completo de ruta.	96
11.3. Energía regenerada en el trayecto de ida en ruta.	96
11.4. SOC al finalizar el trayecto completo en ruta.	98
11.5. SOC (0 km) al finalizar el trayecto completo en ruta.	99
12.1. Influencia del kilometraje y años del vehículo en la resistencia interna de la batería.	106
12.2. Influencia del kilometraje y años del vehículo en el nivel de SOC en la simulación del ciclo WLTP clase 3.	107
12.3. Influencia del kilometraje y años del vehículo en la resistencia interna de la batería.	108
12.4. Influencia en el SOH al variar el tipo de carga realizado y degradarlo en edad.	110
12.5. Actuación de la ventilación forzada por parte del BMS.	111
12.6. Corriente por la batería ante distintas temperaturas de funcionamiento de la batería.	112
12.7. Advertencia por temperatura baja.	113
12.8. Estado de carga inicial luego del precalentamiento.	113
15.1. Ventana gráfica inicial del software	122
15.2. Ventana gráfica principal del software	122
15.3. Ventana gráfica principal del software - Elección de vehículo eléctrico	123
15.4. Ventana gráfica principal del software - Elección de ciclo de conducción	124
15.5. Ventana gráfica principal del software - Cambios previo a la simulación del ciclo de conducción	125
15.6. Ventana gráfica principal del software - Comienzo simulación	125

Índice de figuras

15.7. Ventana gráfica principal del Vehículo Genérico	127
15.8. Ventana gráfica principal - Trayecto dinámico	128
15.9. Ventana gráfica principal - Trayecto dinámico - Elección departa- mento de origen	129
15.10 Mapa del departamento elegido - Elección del punto de origen . .	130
15.11 Mapa del departamento elegido - Elección del punto de origen . .	130
15.12 Mapa del departamento elegido - Elección del punto de origen . .	131
15.13 Mapa del departamento elegido - Elección del punto de origen . .	131
15.14 Ventana gráfica principal Cambiar Parámetros	132
15.15 Ventana gráfica principal Cambiar Parámetros - Visualización de valores actuales	133
15.16 Ventana gráfica principal Cambiar Parámetros - Cambio de valor en un parámetro	133
15.17 Ventana gráfica principal Cambiar Parámetros -	134
15.18 Ventana gráfica principal - Elección función de SOH	135
15.19 Ventana gráfica principal - Estado de salud de la batería SOH . .	136
15.20 Ventana gráfica principal - Selección carga o descarga con la red .	137
15.21 Ventana gráfica principal - Selección carga o descarga con la red .	138
15.22 Ventana gráfica principal - Elección de visualizaciones	139
15.23 Ventana gráfica principal - Elección de visualizaciones - Estado de carga	140
15.24 Ventana gráfica principal - Elección de visualizaciones - Estado de carga	140
15.25 Ventana gráfica principal - Elección de visualizaciones - Estado de carga	141
15.26 Ventana gráfica principal - Comparar vehículos - Selección de ciclo y vehículos.	142
15.27 Ventana gráfica principal - Comparar vehículos - Ver parámetros.	143
15.28 Ventana gráfica principal - Elección de visualizaciones - Estado de carga	144
A.1. Red de carga en Uruguay.	146
A.2. Red de carga en Montevideo.	147
A.3. Red de carga prevista para Uruguay.	147
C.1. Figura representativa de la confrontación entre los vehículos eléctri- cos y a combustión.	151

Esta es la última página.
Compilado el miércoles 30 diciembre, 2020.
<http://iie.fing.edu.uy/>