

Universidad de la República Facultad de Ingeniería



Baterías en Vehículos Eléctricos conectados a la Red

Memoria de proyecto presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República por

Jonathan Acosta Canavese, Alejandro Gigena Fernández, Agustín Mosto Silvestri

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

Tutor

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

TRIBUNAL

Dr. Ing. Gonzalo Casaravilla	Universidad de la República
Dr. Ing. Pablo Monzón	Universidad de la República
Msc. Ing. Pablo Toscano	Universidad de la República

Montevideo miércoles 14 agosto, 2019 Baterías en Vehículos Eléctricos conectados a la Red, Jonathan Acosta Canavese, Alejandro Gigena Fernández, Agustín Mosto Silvestri.

Esta tesis fue preparada en LATEX usando la clase iietesis (v1.1). Contiene un total de 284 páginas. Compilada el miércoles 14 agosto, 2019. http://iie.fing.edu.uy/ El planeta puede vivir sin nosotros. Pero nosotros no podemos vivir sin planeta.

Ανόνιμο

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Agradecimientos

A nuestras familias que durante este trayecto nos han brindado todo su apoyo y contención en pos de cumplir este objetivo.

A los amigos y compañeros, que en el transcurso de esta experiencia se han vuelto imprescindibles compartiendo largos días de estudio, charlas y mate.

A los tutores y docentes que hemos tenido a lo largo de nuestra carrera, los cuales han transmitido los conocimiento que hoy nos permiten estar en este momento.

En resumen, a todas las personas involucradas en nuestro día a día, que nos han acompañado en este recorrido de vida.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

En la actualidad resulta de gran importancia el estudio y desarrollo de energías renovables y limpias, con el fin principal de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Es también necesario plantear nuevas formas de consumo que muestren mayor responsabilidad con el medio ambiente y que lleven a independizarse de fuentes de energía contaminantes como son los combustibles fósiles. Es dentro de este marco que la llegada de los vehículos eléctricos es fundamental para reducir las emisiones contaminantes. En Uruguay, el sector transporte es responsable del 64 % de las emisiones de CO_2 [1]. La descarbonización en el transporte será un paso vital para el cuidado del entorno en que vivimos, la migración hacia los vehículos eléctricos reduciría en un 60 % el consumo de gasolina y evitaría un 30 % de las emisiones provocadas por el sector transporte en Estados Unidos (según un estudio del Massachusetts Institute of Technology) [2]. El beneficio será aún mayor si la electricidad que cargue las baterías proviene de una matriz de generación con una fuerte componente de energías limpias y renovables.

La tecnología V2G (Vehicle to(2) Grid - Vehículo a la Red) permite tener un flujo de potencia bidireccional entre la red del distribuidor de energía y la batería del vehículo, esto hace que pueda cargar el coche desde la red, como también suministrar energía a la red o el hogar desde el mismo. Las baterías de los vehículos eléctricos y la optimización de su uso son de los principales focos de estudio y desarrollo en los últimos años y es de creer que la tendencia en los próximos años seguirá acompañando la mejora de los mismos.

El foco del presente proyecto de grado fue el estudio de baterías en vehículos 100% eléctricos, enchufables, y el análisis de la conveniencia del uso de sistemas V2G. Para ello se realizó un software con la finalidad de simular las cargas y descargas que se dan en la batería de un vehículo eléctrico, implementando ciclos de conducción conocidos internacionalmente y otros ciclos de conducción locales, con el fin de estimar el desempeño, especular y explorar alternativas de explotación evaluando el impacto en la batería.

Se comienza con un estudio del contexto actual de los vehículos eléctricos, su funcionamiento general, para luego avanzar hacia las baterías. De las baterías se estudia su tecnología, funcionamiento, tipos de química disponibles y sus características principales.

Se realiza un estudio de algunos de los vehículos eléctricos con presencia en Uruguay, o con probabilidad de arribo en el corto plazo, profundizando en sus características eléctricas. También se introducen y analizan ciclos de conducción internacionales y ciclos de elaboración propia. Tanto los vehículos estudiados como los ciclos de conducción fueron utilizados en el desarrollo del software implementado en el proyecto.

Mediante la herramienta de modelado Matlab - Simulink, se realiza un modelo del vehículo eléctrico que permite estudiar diferentes características de las baterías y los vehículos, simulando distintos tipos de uso. A partir del modelado se realizan algunas pruebas que permiten realizar variados análisis que serán presentados.

Se genera una aplicación (interfaz gráfica), la cual permite que personas externas al presente proyecto, puedan realizar simulaciones personalizadas (de los vehículos y ciclos de conducción deseados) a efectos de realizar los estudios que cada usuario considere apropiados.

Finalmente, se presenta el análisis de variedad de situaciones simuladas con el software implementado, y un breve estudio desde el punto de vista de la rentabilidad económica que enfrenta la posibilidad de adquirir un coche eléctrico en contrapartida de adquirir uno a combustión y de la comparativa de utilizar o no un sistema V2G con el vehículo eléctrico.

Lista de acrónimos

- Crate Tasa de descarga/carga
- DoD Depth of Discgarge (Profundidad de descarga)
- G2V Grid to vehicle (Vehículo hacia la red)
- IEC Internal Engine Combustion (Vehículo de combustión interna)
- WLTP Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
- NMC Niquel Manganeso Cobalto
- SoC State of Charge (Estado de carga)
- SoH State of Health (Estado de salud)
- V2G Vehicle to grid (Vehículo hacia la red)
- VE Vehículo eléctrico
- NEDC New European Driving Cicle

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Agradecimientos	III
Resumen	\mathbf{V}
Lista de acrónimos	VII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes del proyecto	1
1.2. Descripción del proyecto	2
1.3. Metodología de trabajo	3
2. Contexto actual de los VE	5
2.1. Vehículos eléctricos en la historia	5
2.2. Tipos de VE	9
3. Componentes y funcionamiento de un VE	13
3.1. Comparación entre VE y un vehículo ICE	13
3.1.1. Funcionamiento básico del motor de combustión interna	13
3.1.2. Funcionamiento básico del motor eléctrico	14
3.1.3. Comparación entre el motor de combustión y el motor eléctrico	o 15
3.1.4. Almacenamiento de energía: Batería vs Gasolina	17
3.2. Componentes de un vehículo eléctrico	18
3.2.1. Esquema genérico	18
3.2.2. Motores eléctricos	20
3.2.3. Convertidores	25
3.2.4. Baterías	28
3.3. Carga en AC y DC	28
3.3.1. Pines de control	28
3.3.2. Carga AC	32
3.3.3. Carga DC	36
4. Baterías	43
4.1. Conceptos generales sobre baterías	43
4.1.1. Unidad básica o celda	44
4.1.2. Clasificación de celdas o baterías	45
4.1.3. Funcionamiento de la celda	46

	4.2.	Parámetros de las baterías					
	4.3.	Clasificación de baterías según su química	50				
		4.3.1. Baterías de plomo ácido	51				
		4.3.2. Baterías de Níquel Cadmio	52				
		4.3.3. Baterías con electrodo de hierro	53				
		4.3.4. Baterías de Hidruro de Níquel-Metal	53				
		4.3.5. Baterías para Vehículos Eléctricos	54				
	4.4.	Baterías de Litio	55				
		4.4.1. Consideraciones de funcionamiento	55				
		4.4.2. Características según su diseño	56				
		4.4.3. Características según su composición química	57				
		4.4.4. Factores que afectan el funcionamiento	63				
		4.4.5. Carga en baterías de Litio	66				
		4.4.6. Desarrollos a futuro	68				
5.	Veh	ículos a estudiar	69				
	5.1.	Renault Kangoo	69				
		5.1.1. Modelo 2011 - 22 kWh	69				
		5.1.2. Modelo 2017 - 33kWh	70				
	5.2.	Nissan Leaf	71				
	5.3.	Renault Zoe	71				
	5.4.	BYD E6	72				
	5.5.	Volkswagen e-UP!	73				
	5.6.	Tabla con características	74				
6.	Cicl	os de Conducción	75				
	6.1.	Conceptos generales sobre ciclos	75				
		6.1.1. Ciclos de Conducción estandarizados	76				
		6.1.2. Ciclo WLTP	77				
	6.2.	Ciclo Montevideo	79				
7.	Con	sideraciones para el modelado	81				
	7.1.	Modelado del Torque	82				
		7.1.1. Descripción general del movimiento del vehículo $\ldots \ldots$	82				
		7.1.2. Resistencia del vehículo	83				
		7.1.3. Ecuación dinámica	89				
		7.1.4. Tren de fuerza y velocidad del vehículo	91				
		7.1.5. Torque en las ruedas del vehículo	93				
	7.2.	Modelado del Motor	95				
	7.3.	Modelado de la batería	98				
	7.4.	Algoritmo del estado de salud (SOH)	102				
		7.4.1. Resumen	102				
		7.4.2. Modelo desarrollado	102				
		$7.4.3.\;$ Adaptaciones realizadas al modelo para aplicación en VEs .	106				
		7.4.4. Análisis del modelo del SOH	109				

8.	Mo	delo realizado en Simulink	115
	8.1.	Descripción general de los bloques	116
	8.2.	Gestor - Ciclo de Conducción	117
	8.3.	Entorno	118
	8.4.	Conductor	119
		8.4.1. Bloque conductor - Controlador	119
	8.5.	Controlador	121
		8.5.1. Sub bloques superiores	123
		8.5.2. Sub bloques inferiores	124
	8.6.	Carga y descarga contra la red $(V2G/G2V)$	125
		8.6.1. Bloques de entradas desde el workspace	125
		8.6.2. Bloque $V2G/G2V_Crnt$	126
	8.7.	Vehículo de Pasajeros	130
		8.7.1. Planta eléctrica (motor - batería)	131
		8.7.2. Tren de conducción (Drivetrain EV)	139
		8.7.3. Visualization \ldots	144
9.	Inte	erfaz Gráfica	145
	9.1.	Manual de usuario	146
	-	9.1.1. Simular ciclo de conducción	148
		9.1.2. Simular descarga desde el vehículo hacia la red	156
		9.1.3. Simular carga desde la red	157
		9.1.4. Cambiar parámetros del motor, batería, vehículo, ambiente,	
		carga y descarga	158
		9.1.5. Comparar vehículos eléctricos	161
10	Ъ		105
10	$\mathbf{Pru}_{10,1}$	leba ciclo de conducción urbano en vehículo electrico	167
	10.1	Percentralizado en las pruebas	107
	10.2	Datos recabados	100
	10.5	Processmiento de datos	173
	10.4 10.5	Simulación Ciclo Completo Montevideo	174
	10.0		111
11	.Vali	idación de los modelos	181
	11.1	. Autonomía	182
	11.2	. Carga	183
	11.3	. Vida útil de la batería	184
12	.Esti	udios realizados	187
	12.1	. Comparativa de ciclos de conducción e influencia de la pendiente $% \mathcal{L}^{(n)}_{(n)}$.	187
		12.1.1. Autonomía	188
		12.1.2. Exigencia a la batería y al motor \hdots	190
	12.2	. Comparativa de rendimientos con Ciclo Montevide o $\ \ . \ . \ . \ .$	194
		12.2.1. Análisis del rendimiento y la energía consumida para los	
		vehículos	196

	12.2.2. Análisis del estado de carga final para el ciclo Montevideo	
	en todos los vehículos.	197
12.3.	Evaluación del ciclo Estándar diario	199
	12.3.1. Estudio del ciclo Estándar	199
	12.3.2. Evaluación del Ciclo Estándar	201
	12.3.3. Gestión de la carga de batería	204
	12.3.4. Estudio con ciclo Estándar y descarga V2G	206
	12.3.5. Optimización de uso según vida útil de la batería	208
13.Rent	abilidad económica	211
13.1.	Costos de la energía	211
	13.1.1. Tarifas de energía eléctrica	212
	13.1.2. Costo de combustibles	213
13.2.	Costos de un VE vs un ICE	214
10.2	13.2.1. Costo de la energía consumida	214
	13.2.2. Costo de mantenimiento	215
	13.2.3 Medidas de incentivo a los vehículos eléctricos en Uruguay	216
	13.2.4. Cálculo de recuperación de inversión inicial	217
13.3	Rentabilidad del sistema V2G	218
10.0.	13.3.1. Ganancia por carga diferida	219
	13.3.2. Cálculo de energía entregada y ganancia asociada	$\frac{-10}{220}$
13.4.	Coste de las baterías de los VEs	$\frac{\circ}{222}$
13.5.	Análisis de resultados obtenidos	223
13.6.	Complemento análisis económico	228
10.01	13.6.1. Resultados considerando la ecuación 13.5	$\frac{0}{229}$
	13.6.2 Resultados considerando la ecuación 13.5	230
		200
14.Cond	clusiones	233
14.1.	Modelado	233
14.2.	Ciclos Internacionales	234
14.3.	Comparativa de vehículos	235
14.4.	Ciclo estándar diario y análisis del SOH de las baterías	236
14.5.	Rentabilidad económica	237
15.Trab	pajo a futuro	241
A. Date	os técnicos de los vehículos utilizados en las simulaciones	243
B. Conv	versión de autonomía ciclo NEDC a WLTP	247
Referen	icias	249
Índice o	le tablas	259
Índice o	le figuras	262

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes del proyecto

En la actualidad, gran parte de las emisiones contaminantes y los gases de efecto invernadero en el planeta provienen del sector transporte, debido a los motores a combustión interna utilizados [3]. Con el paso del tiempo, la calidad del aire disminuye, la cantidad de gases de efecto invernadero aumenta, y ocurren más frecuentemente desastres naturales, los cuales tienen relación directa con el calentamiento global.

Sumado a esto, se tiene que las reservas mundiales de petróleo se están agotando [4], por lo que en lo relacionado al transporte es necesario desarrollar energías alternativas para un mercado que cada vez crece más. En base a ello, varios países han propuesto fechas límite para la erradicación de los vehículos a combustión interna.

La preocupación mundial por el calentamiento global es tal que, el 22 de Abril del 2016 se firma el Acuerdo de París, que establece medidas para la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a través de la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a efectos del Calentamiento Global. El artículo 2 menciona los objetivos del acuerdo.

"Tratado de París - Artículo 2 [5]

- 1. El presente Acuerdo, al mejorar la aplicación de la Convención, incluido el logro de su objetivo, tiene por objeto reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza, y para ello:
 - a) Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático;

Capítulo 1. Introducción

- b) Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos;
- c) Elevar las corrientes financieras a un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.
- 2. El presente Acuerdo se aplicará de modo que refleje la equidad y el principio de las responsabilidades comunes pero diferenciadas y las capacidades respectivas, a la luz de las diferentes circunstancias nacionales.

,,

Por todo lo expuesto anteriormente, es necesario investigar más en tecnologías "limpias", con lo cuál, el estudio de vehículos 100 % eléctricos es fundamental. Actualmente, las desventajas principales que tiene el vehículo eléctrico son su menor autonomía y mayor costo, frente al vehículo de combustión interna. Esos dos problemas radican fundamentalmente en la batería del vehículo, con lo cuál su estudio es un tema de gran relevancia.

Cabe destacar que las autonomías alcanzadas en la actualidad son suficientes para el uso urbano cotidiano de la mayoría de los usuarios de vehículos.

1.2. Descripción del proyecto

El proyecto consiste en el estudio de los vehículos $100\,\%$ eléctricos y sus baterías.

Se comienza con un estudio del contexto actual de los vehículos eléctricos, su funcionamiento general, para luego centrarse en el estudio de las baterías. De las baterías se estudia su tecnología, funcionamiento, tipos de químicas disponibles, características y formas de carga.

Luego se hace un estudio de vehículos 100% eléctricos, profundizando en sus características eléctricas. También se introducen y analizan ciclos de conducción internacionales y personalizados.

Posteriormente se realiza un modelado en Matlab - Simulink del vehículo eléctrico, el cuál se utiliza para estudiar diferentes características de las baterías, por ejemplo su autonomía y ciclos de vida. Utilizando el modelado, se realizan varias pruebas y se obtienen conclusiones de la comparación de las baterías en cuanto a sus principales características.

En base a lo anterior, se estudia como afecta un sistema de vehículo conectado a la red (V2G) desde el punto de vista de las baterías y su rentabilidad económica. Por último, se genera una aplicación (interfaz gráfica), la cual permite que personas ajenas al proyecto, puedan realizar simulaciones personalizadas de los vehículos y ciclos a efectos de realizar los estudios que cada usuario considere apropiados.

1.3. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo se divide según las tareas principales. En cuanto a la investigación de los vehículos eléctricos, se realizó una recopilación, ordenamiento y documentación, en base a materiales académicos, papers y sitios idóneos, los cuales permiten aplicar los conceptos en etapas posteriores del proyecto.

Para la realización del modelado del vehículo eléctrico, se utiliza la herramienta Simulink de Matlab. También se utiliza la herramienta GUI (Graphical User Interfaces) de Matlab para generar la interfaz gráfica que será utilizada para realizar simulaciones en dicho modelo.

A los efectos de la validación del modelado anterior, en el proyecto se utilizan datos brindados por fabricantes de los vehículos. También se realizaron recorridos y pruebas reales con un vehículo eléctrico (propiedad de UTE) para validar el modelo.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 2 Contexto actual de los VE

En el presente capítulo, se describe el estado de situación actual de los vehículos eléctricos (VE). Se repasa el surgimiento y avances en los VE, así como también se detallan distintos tipos de vehículos con propulsión eléctrica.

2.1. Vehículos eléctricos en la historia

Los vehículos eléctricos no son una innovación reciente. Han existido casi desde el mismo momento que los propulsados por motores de combustión interna. Fueron producidos por primera vez a mediados del siglo XIX. Las primeras implementaciones de vehículos eléctricos estaban basadas en baterías no recargables (primarias), pero recién en el año 1859, junto al desarrollo de la tecnología, es que se presenta la invención de la batería recargable de plomo-ácido por el físico francés Gastón Planté. Este desarrollo permitió la viabilidad de los vehículos eléctricos.

El interés en los vehículos propulsados por un motor eléctrico aumentó considerablemente en la década de 1890 y principios de 1900. Se contó con varias marcas que se lanzaron a producir vehículos eléctricos. Entre las primeras se encuentra la empresa estadounidense Baker Motor Vehicle, originaria de Ohio (EE.UU), que en 1899 produjo el Baker Electric, un vehículo de dos asientos, que tenía una velocidad máxima de 23 km/h y cuyo precio fue de 850 dólares.



Figura 2.1: Descripción del Baker Electric, año 1899.

En el año 1902 la empresa estadounidense Studebaker Brothers Manufacturing Company presentaba el vehículo Studebaker Electric. Dicha empresa se dedicó al

Capítulo 2. Contexto actual de los VE

mercado de los vehículos eléctricos hasta 1912, con precios desde los 950 dólares hasta los 1.800, una autonomía que iba desde los 50 a los 130 km y alcanzar velocidades de 5 a los 29 km/h.

Otras marcas que iniciaron el camino de los vehículos eléctricos fueron Anthony Electric, Detroit y Edison entre otras. Durante los principios del siglo XX tuvieron relativo éxito comercial.



Figura 2.2: Detroit Electric y su publicidad del año 1912.

En esa primera década del siglo XX, los vehículos eléctricos basaban su popularidad por su facilidad de uso y menores ruidos que los de gasolina. En los comienzos también fueron comercializados para las mujeres, como un coche tranquilo, limpio y especialmente al no requerir el arranque manual con manivela que sí necesitaban los automóviles de gasolina de la época.

A comienzos de siglo XX, en Estados Unidos el 40% de los automóviles eran impulsados a vapor, el 38% eran eléctricos, y el 22% de gasolina. En ese país se habían registrado 33.842 coches eléctricos. Las ventas de coches eléctricos alcanzaron su punto máximo en la década de 1910.

Pero no todas las noticias son buenas para el vehículo eléctrico, ya que para la década de 1920 se encuentra el primer declive de esta tecnología. Esto se basa en el descubrimiento de nuevas y grandes reservas de petróleo, las cuales llevaron a la disminución de precios de la gasolina, haciendo que los coches de combustión interna sean más baratos de operar. A esto se suma la mejor autonomía y velocidades de los vehículos a combustión, lo cual conspiró profundamente para que el vehículo eléctrico basado en baterías no puediera competir de igual a igual con los vehículos a combustión.

Luego de la segunda guerra mundial se apreció un nuevo interés en el desarrollo de los vehículos eléctricos, los principales vehículos que alcanzaron cierta comercialización fueron el Henney Kilowatt (año 1959), perteneciente a la empresa Henney Motor Company, el CitiCar (1974), fabricado por la empresa Sebring, y el Lectric Leopard (1979) de la empresa U.S. Electricar Corporation.

Más cerca en el tiempo se tienen vehículos eléctricos más conocidos, como el modelo EV-1 de General Motors, el cual fue comercializado desde fines de los 90, el cual contaba con motor de potencia de 137 CV (100,7 kW) y una batería que permitía una autonomía de 200 km. Las primeras versiones del EV1 se fabricaban con baterías de plomo-ácido, las cuales luego fueron sustituidas por baterías de Ni-Mh.



Figura 2.3: Modelo EV1 de General Motors.

En el año 1997, Toyota presentó su modelo Prius, el cual si bien no es un vehículo puramente eléctrico, es el vehículo híbrido más popular a nivel mundial comercializado hasta la fecha.

Desde hace varias décadas, el mayor avance se obtiene del desarrollo de las baterías, piedra angular del coche eléctrico. Las mismas inicialmente eran de plomo o níquel, su capacidad era reducida y no podían transmitir la potencia suficiente.

Capítulo 2. Contexto actual de los VE

La constante investigación sobre el tema ha brindado grandes avances para que más empresas comiencen a plantearse seriamente en tener modelos de vehículos puramente eléctricos.

En el año 2003 surge la empresa Tesla, la cual comienza a diseñar vehículos con grandes prestaciones. En el año 2006 se lanza el Tesla Roadster, el cual posee una autonomía de casi 400 km y es capaz de alcanzar los 200 km/h.

En los últimos años, más fabricantes se suman a la revolución de los vehículos eléctricos. En 2010 Nissan lanzó el modelo Leaf, el cual al día de hoy se mantiene como el modelo eléctrico más vendido en el mundo (más de 100.000 unidades).



Figura 2.4: Modelo Nissan Leaf y su interior.

Hoy en día existen legislaciones y beneficios para promover la utilización de vehículos eléctricos en la mayoría de los países. Esto junto con una correcta distribución de estaciones de carga permite pensar que el futuro de los vehículos eléctricos está llegando.

2.2. Tipos de VE

El presente proyecto está basado en vehículos eléctricos que utilizan baterías como forma de acumulación de energía. Aparte de los vehículos basados puramente en baterías, existen otros tipos de vehículos que utilizan motores eléctricos para su funcionamiento. En el presente capítulo, se darán a conocer los diferentes tipos de vehículos eléctricos que existen en el mercado, tales como los híbridos convencionales no enchufables (HEV (Hybrid Electric Vehicle)), los híbridos enchufables (PHEV (Plug in Hybrid Electric Vehicle)), los basados puramente en baterías (BEV (Battery Electric Vehicle)), y los basados en celdas de hidrógeno (FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)).

A continuación se realiza una breve descripción de estos modelos.

Híbridos Convencionales (HEV)

Los vehículos híbridos convencionales (HEV - Hybrid Electric Vehicle) combinan un motor de combustión con un motor eléctrico. Además poseen baterías, las cuales no se puede enchufar para recargar, sino que son recargadas mediante un generador accionado por el motor de combustión interna cuando hay excedentes de potencia. Dependiendo del tipo de configuración (serie o paralelo), tanto el motor de combustión como el motor eléctrico pueden llegar a ser los responsable de impulsar el vehículo. Cuando la configuración es en paralelo, tanto el motor eléctrico como el de combustión interna están conectados a las ruedas del vehículo, pudiendo trabajar de forma conjunta o por separado. En cambio, en los híbridos en serie, el vehículo se mueve con la potencia que suministra el motor eléctrico, utilizando la electricidad suministrada por el generador accionado por el motor de combustión interna. La finalidad de los vehículos híbridos no es tanto el hecho de poder circular constantemente en modo eléctrico si no reducir el consumo de carburante y la emisión de gases [6].



Figura 2.5: Esquema de vehículo híbrido, configuración en serie.

Capítulo 2. Contexto actual de los VE

• Híbridos Enchufables (PHEV)

Los híbridos enchufables (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle), al igual que los vehículos híbridos convencionales, cuentan con un motor de combustión, normalmente de gasolina, acompañado por un motor eléctrico. Ambos motores son capaces de mover el coche por sí mismos y también de forma combinada. La principal diferencia radica en que la batería tiene la posibilidad de cargarse a través de la red eléctrica (enchufable) por lo que puede utilizarse como un vehículo totalmente eléctrico para distancias cortas. Por lo tanto, el conductor puede seleccionar el modo de funcionamiento para obligar a que el coche se mueva únicamente con el motor eléctrico, con el de combustión o combinando los dos en función de los requerimientos del recorrido a realizar [7].

Vehículos basados puramente en baterías (BEV)

Los vehículos eléctricos a batería o BEV (Battery Electric Vehicle) se mueven únicamente gracias a la intervención de uno o varios motores eléctricos alimentados por un paquete de baterías, el cual luego de su uso puede ser recargado en la red. La mayoría de los modelos de este tipo incorporan un sistema de recuperación de energía en las desaceleraciones, el cual recarga las baterías en esas situaciones. Las baterías pueden ser recargadas de varias formas (carga en distintas potencias, AC y DC, se estudiará en profundidad en el capítulo 3, sección 3.3) lo cual da gran versatilidad dependiendo de los recorridos a realizar [6] [8]. Un mayor desarrollo acerca de los principales componentes que forman parte del VE puede encontrarse en la sección 3.2, así como también, la temática de las baterías en VE se desarrollará en el capítulo 4. En el capítulo 5 se describen las características mecánicas y eléctricas de varios VE utilizados en la actualidad.

Vehículos basados en celdas de hidrógeno (FCEV)

Los Vehículos eléctricos basados en celdas de combustible (FCEVs - Fuel Cell Electric Vehicle) hacen uso de un motor eléctrico, al igual que un BEV, pero en cambio almacenan gas hidrógeno en un tanque. La electricidad se genera a partir de la reacción química que se produce con el hidrógeno: éste se oxida perdiendo electrones que se capturan para generar una corriente que alimenta un motor eléctrico. Al igual que los BEV, no generan residuos contaminantes ya que el producto de la combustión es el agua. A diferencia de los BEV o PHEV, no es necesario la recarga con la red eléctrica ya que únicamente se debe llenar el tanque de hidrógeno cuando el mismo es consumido.



Figura 2.6: Vehículo basado en celdas de hidrógeno.

En comparación con los BEV, las principales ventajas de los FCEV son la mayor autonomía y tiempos de recarga rápidos. Como contrapartida, al ser una tecnología que se encuentra en desarrollo, los vehículos son más costosos, tienen menor eficiencia global (ya que hay que producir, comprimir y transportar ese hidrógeno) y menor potencia del motor (cuanto más potente, más grande y cara resulta la celda de hidrógeno). Debido a que aún no es una tecnología tan desarrollada, los FCEV son más convenientes para vehículos de grandes dimensiones [9].

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 3

Componentes y funcionamiento de un VE

Luego de presentar los vehículos eléctricos en la historia, es necesario interiorizar en el funcionamiento del vehículo eléctrico.

El presente capítulo se centrará en desarrollar varios aspectos para comprender correctamente el funcionamiento del VE.

Se realizarán comparaciones entre los vehículos a combustión y los VE, con el fin de destacar sus beneficios. Posteriormente se procederá a estudiar los principales componentes del VE (motor, baterías, conversores, entre otros) y su funcionamiento.

Por último, se desarrollará la temática de carga en los VE (en AC y DC) detallando su funcionamiento básico y los tipos de conectores utilizados actualmente en el mercado.

3.1. Comparación entre VE y un vehículo ICE

Con el fin de comparar los atributos de los vehículos a combustión y los VE, se realizará en la presente sección un breve desarrollo en cuanto al funcionamiento de sus motores. Luego se procede a compararlos desde el punto de vista relacionado con la energía, potencia y la eficiencia.

Posteriormente se realizará una comparación en cuanto a la modalidad de almacenamiento de energía (gasolina vs batería).

3.1.1. Funcionamiento básico del motor de combustión interna

Una de las principales diferencias entre el vehículo eléctrico y el vehículo de combustión interna es el motor. En esta sub-sección se procederá a analizar el funcionamiento de un motor de combustión interna ICE (Internal Combustion Engine).

La imagen 3.1 muestra el funcionamiento de un motor de combustión interna de cuatro tiempos.



Capítulo 3. Componentes y funcionamiento de un VE

Figura 3.1: Fases de un motor de cuatro tiempos [10].

A continuación se explican los distintos pasos en la imagen 3.1.

- 1. En el primer golpe se abre una válvula y la gasolina es inyectada a la recamara. Luego se cierra dicha válvula.
- 2. En el segundo golpe, el cilindro se mueve hacia arriba comprimiendo la gasolina.
- 3. En el tercer golpe, la mezcla de combustible y aire explota al provocarse la chispa en la bujía produciendo un movimiento rotativo del pistón. Esto es comparable al movimiento de una bicicleta, el cuál al mover el pedal hacia abajo se inicia el movimiento de la bicicleta.
- 4. Por último, en el cuarto golpe, se abre la válvula y sube el pistón, dejando salir los gases quemados.

3.1.2. Funcionamiento básico del motor eléctrico

A continuación se realiza una breve descripción del funcionamiento básico de un motor de corriente continua. Un mayor desarrollo en cuanto a los motores utilizados en los vehículos eléctricos y sus principales características constructivas puede encontrarse más adelante en el punto 3.2.2.

A continuación se enuncia la Ley de Lorentz, la cual será de utilidad para comprender el funcionamiento de los motores eléctricos.

• Ley de Lorentz

La ley de Lorentz establece que una partícula cargada 'q' que circula a una velocidad \vec{v} por un punto en el que coexisten una intensidad de campo magnético \vec{B} , y un campo eléctrico \vec{E} , sufrirá la acción de una fuerza \vec{F} denominada fuerza de Lorentz cuyo valor es proporcional al valor de 'q', \vec{B} y \vec{v} , y \vec{E} , la cual se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$F = q \cdot \vec{E} + q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \tag{3.1}$$

3.1. Comparación entre VE y un vehículo ICE



Figura 3.2: Funcionamiento básico del motor eléctrico de corriente continua

A continuación se detalla el funcionamiento básico del motor eléctrico, el cual se observa en la figura 3.2.

- 1. En el conductor metálico en forma de bobina se hace circular corriente.
- 2. Se introduce ésta bobina entre dos imanes con diferente polarización estableciendo un campo magnético, con lo cuál, a partir de la ley de Lorentz, un lado de la bobina será impulsado hacia arriba y el otro hacia abajo.
- 3. Esto hace girar a la bobina hasta el momento que llega a la posición vertical. En ese momento se cambia rápidamente la polaridad de la corriente por efecto del colector con contactor.
- 4. El efecto final es un movimiento rotacional, la cuál termina siendo lo que impulsa el movimiento del vehículo.

3.1.3. Comparación entre el motor de combustión y el motor eléctrico

Al realizar una comparación entre los motores ICE con motores eléctricos encontramos varias ventajas, desde el punto de vista constructivo, como son menores tamaños y menores complejidades en su construcción a favor del eléctrico.

Desde el punto de vista de su funcionamiento, los motores eléctricos entregan potencia constante en casi todo el rango de velocidades. Esto proporciona pares elevados a bajas rpm y pares reducidos a altas rpm. En la figura 3.3 se muestra una curva característica de par y potencia en un vehículo eléctrico comparado con un motor ICE, la cual muestra de forma cualitativa el comportamiento antes mencionado.

Capítulo 3. Componentes y funcionamiento de un VE



Figura 3.3: Comparación torque y potencia. Vehículo eléctrico vs ICE

Como se mencionó anteriormente, a bajas velocidades, el motor eléctrico proporciona un par máximo y constante (zona de par constante) hasta su velocidad nominal. Una vez que el motor eléctrico alcanza dicha velocidad, el par se reduce proporcionalmente con la velocidad manteniendo la potencia constante (zona de potencia constante).

A continuación en la tabla 3.1 se continúa con las comparaciones, en este caso, se muestran valores genéricos para motor ICE y motor eléctrico en cuanto a su eficiencia, densidad de potencia y potencia específica.

	Motor de combustión	Motor eléctrico	El motor eléctrico
Potencia	1.3 kW/kc	2.10 kW/kg	3 voces mayor potoncia
específica	1-5 KW/Kg	0-10 KW/Kg	5 veces mayor potencia
Densidad de	0.4 kW/1	12.6 LW /1	40 voces money temeño
potencia	0.4 KW/I	13.0 KW/1	40 veces menor tamano
Eficiencia	5% - 30%	93% - $96%$	3 - 20 veces mas eficiente
	Muchas partes móviles	Una sola parte móvil	Tiene menos mantenimiento

Tabla 3.1: Comparación de potencia específica, densidad de potencia y eficiencia entre los VE y los ICE.

Al observar los datos, podemos comprobar lo dicho anteriormente; el vehículo eléctrico insumirá menos espacio para una determinada potencia de motor.

A modo de ejemplo, se presentan los datos de vehículos eléctricos actuales en el mercado frente a un motor de combustión interna.

3.1.	Comparación	entre	VE y	un	vehículo	ICE
------	-------------	-------	------	----	----------	-----

Vehículo	Litro/km	kWh/km	Relación
Combustión Interna	0.0714*	0.643**	1
Renault Kangoo ZE		0.188 [11]	3.42
Renault Zoe		0.158 [12]	4.07

Tabla 3.2: Comparación de rendimientos entre EVs y un vehículo de combustión interna. * Se asume que el vehículo ICE tiene un rendimiento de 14 km/l.

** Se asume la densidad energética volumétrica de la gasolina en 9000 Wh/l.

En la tabla 3.2 se observa el rendimiento en kWh/km entre los vehículos de combustión interna y los VE. La relación entre los rendimientos muestra la ventaja que tienen los VE contra los vehículos de combustión interna, ya que por ejemplo el Renault Zoe necesita 0.158 kWh para recorrer 1 km, y un vehículo de combustión interna necesita 0.643 kWh para recorrer 1 km, considerando que el mismo tiene un rendimiento de 14 km por litro de gasolina.

3.1.4. Almacenamiento de energía: Batería vs Gasolina

En la tabla 3.3 se observa la comparación de la energía específica de la gasolina frente a las baterías de plomo ácido y distintos tipos de batería con presencia de Litio en su electrolito (que se verán con mayor profundidad en el capítulo 4.

Fuente de energía	Año	Energía (Wh/kg)	Comparado con gasolina
Gasolina	1900-2019	12.000	-
Plomo ácido (Lead-Acid)	1900	10	1200 veces menor
Plomo ácido (Lead-Acid)	2000	35	350 veces menor
NiMH	2000	80	150 veces menor
LMO	2015	100-150	80-100 veces menor
LFP	2015	90-120	100-130 veces menor
NMC	2015	150-220	55-80 veces menor
NCA	2015	200-260	45-60 veces menor

Tabla 3.3: Comparación energía específica de la gasolina frente a los diferentes tipos de baterías [13]

Como se mencionó en el capítulo 2, la razón principal por la cuál los VE no triunfaron en el pasado frente a los vehículos de combustión interna fue por el tamaño y peso que requerían las baterías, ya que el combustible era una fuente de energía mucho mas eficiente. Sin embargo, como se observa en la tabla 3.3, las baterías han ido mejorando a lo largo del tiempo.

Hoy en día, el VE compite con el vehículo de combustión interna, ya que por ejemplo, un recorrido normal diario puede llegar a ser de 30-40 km de distancia, y dicho número es un valor que es capaz de recorrer con éxito un VE, dado que actualmente las autonomías que poseen los VE superan ampliamente dicho valor. En en capítulo 10 se analiza un recorrido dentro de la ciudad de Montevideo de 42.3 km realizado con una Renault Kangoo Z.E. de 22kWh, y al finalizar el trayecto la misma tenía 53 % de energía remanente disponible. Esto implica que actualmente

Capítulo 3. Componentes y funcionamiento de un VE

los VE son totalmente capaces de cubrir las necesidades diarias para la mayoría de los conductores y competir contra los vehículos a gasolina.

Gracias a la investigación y desarrollo de las baterías, próximamente los VE serán cada vez más livianos, además que el precio de las baterías irá disminuyendo, con lo cuál, en un futuro próximo el costo de la inversión inicial entre un VE y un vehículo a gasolina no tendrá mucha diferencia, sumándole que con el paso del tiempo el VE es mas económico para el usuario debido a la diferencia de precio entre sus fuentes de propulsión (combustible y energía eléctrica) y de los costos de mantenimiento.

3.2. Componentes de un vehículo eléctrico

En la presente sección se introduce una descripción de los componentes que forman parte de un vehículo eléctrico. Se ilustra en un esquema genérico los diferentes elementos de un VE, tales como su batería, transmisión, convertidores, motor, entre otros. Luego se procede a analizar los diferentes tipos de motores utilizados en los VEs y su aplicación en distintos vehículos. Además, se mencionan los convertidores de electrónica de potencia utilizados en un VE para su funcionamiento.

3.2.1. Esquema genérico

A continuación se muestra un esquema de los componentes de un vehículo eléctrico. Más adelante se profundizará en algunos de esos elementos tales como el motor y los convertidores.



Figura 3.4: Esquema genérico de un vehículo eléctrico [14]

La figura 3.4 ilustra los componentes internos de un VE.

A continuación se explica en que se utiliza cada componente.

- Conector para realizar la carga: es un conector presente en el VE que permite recargar la energía de la batería mediante una fuente de energía externa.
- Batería de tracción: es la batería utilizada para almacenar energía en el VE y transmitirla al motor de tracción para accionar el movimiento del vehículo.
- Cargador a bordo: Conversor que acondiciona la potencia de entrada, que puede ser AC o DC dependiendo del tipo de vehículo y de carga, a una potencia DC acondicionada para cargar la batería de tracción. Luego utilizando el Battery Managment System (BMS) se controlan y manejan los valores de la batería, tales como corriente, voltaje, temperatura y estado de carga.
- **Convertidor para batería:** Es un convertidor DC-DC utilizado para elevar el voltaje que suministra la batería, para luego utilizarlo en el motor de tracción.
- Accionador del motor: dependiendo si el motor a accionar es de corriente alterna o corriente continua, el accionador es un convertidor DC/AC o DC/DC, el cuál es utilizado para convertir potencia desde el BUS DC de alto voltaje a potencia AC (o DC) para la operación del motor. El convertidor es bidireccional, para que sea útil cuando la batería le entrega energía a el motor, o en el frenado regenerativo cuando el motor le entrega energía a la batería.
- Motor de tracción/generador: Es el dispositivo de propulsión en un VE, el cuál transforma la energía eléctrica suministrada por la batería de tracción en energía mecánica para el rodamiento del vehículo. Además es capaz de extraer energía de las ruedas cuando se está desacelerando, y transferirlo a la batería de tracción del vehículo.
- **Transmisión:** para un VE, usualmente una sola transmisión con diferencial es suficiente para transferir potencia desde el motor de tracción a las ruedas.
- Convertidores de electrónica de potencia: los convertidores de electrónica de potencia están hechos de varios dispositivos semiconductores de rápida actuación y gran potencia, que actúan como switches de gran velocidad. Mediante conmutaciones en las llaves, y utilizando elementos capacitivos e inductivos, se logra alterar la corriente y el voltaje de entrada en el convertidor, para luego regular a la salida otra corriente y voltaje diferentes a los de la entrada.
- **Controladores de electrónica de potencia:** controla el flujo de potencia eléctrica en los diferentes convertidores de electrónica de potencia que hay en el vehículo.

Capítulo 3. Componentes y funcionamiento de un VE

• **Batería auxiliar:** provee electricidad para arrancar el vehículo antes de utilizar la batería de tracción, y además es utilizada para brindarle potencia eléctrica a los accesorios del VE.

3.2.2. Motores eléctricos

Al momento de seleccionar el tipo de motor para un VE se debe tener en cuenta la masa del vehículo y el rendimiento que se quiere para la aceleración, entre otras características.

Con el fin de profundizar sobre esta temática, existen varios tipos de motores eléctricos que pueden ajustarse perfectamente a las necesidades del VE. Los más utilizados en VE son los siguientes:

- Motor DC con escobillas
- Motor de inducción
- Motor de imanes permanentes
- Motor sincrónicos de reluctancia

A continuación se describen los diferentes tipos de motores.

3.2.2.1. Motor DC con escobillas



Figura 3.5: Motor DC con escobillas [15]

Este tipo de motor no es de los más utilizados actualmente, pero igualmente se realizará una breve descripción de su funcionamiento.

3.2. Componentes de un vehículo eléctrico

Éste motor tiene un estator y un rotor con una bobina en el mismo. Cuando la bobina es conectada a una batería mediante las escobillas, produce corriente DC, con lo cuál la bobina genera un campo magnético que hace que el rotor gire, debido a que los polos del campo magnético generado se oponen a el campo magnético generado por los imanes en el estator. Para mantener el giro, es necesario ir alternando la polaridad de la bobina mediante las escobillas. En la figura 3.5 se muestra un motor DC con escobillas.

- Ventajas:
 - Control de velocidad sencillo.
 - Gran capacidad de sobrecarga.
 - Tamaño pequeño.
 - Alto par de arranque.
- Desventajas:
 - Mantenimiento costoso, debido al desgaste de sus escobillas.

3.2.2.2. Motor de inducción



Figura 3.6: Motor de inducción [16]

Este tipo de motor es utilizado muy a menudo en los VE.

El motor de inducción AC no necesita imanes permanentes. El campo magnético es producido por la corriente que circula por el bobinado del estator. Si se conecta el estator con un voltaje alterno, por las espiras circulará una corriente alterna que genera un campo magnético alterno. Si la entrada al estator es corriente trifásica, se creará un campo magnético giratorio. El campo magnético del estator, inducirá voltaje y corriente al bobinado del rotor (de ahí el nombre de motor de inducción). Esto produce que el rotor cree su propio campo magnético, e intentará seguir al campo magnético del estator y el mismo hará que el rotor comience a girar. Con lo cuál, el rotor tenderá a seguir el campo rotatorio del estator, sin la necesidad de utilizar escobillas. Capítulo 3. Componentes y funcionamiento de un VE

- Ventajas:
 - Simple y robusto.
 - No necesita escobillas.
 - No necesita imanes permanentes.
 - No necesita mecanismo de arranque.
 - Se controla la velocidad fácilmente.
- Desventajas:
 - Corrientes inducidas en el rotor causan calentamiento y pérdidas.
 - No es el motor mas liviano y compacto.

3.2.2.3. Motor de imanes permanentes



Figura 3.7: Motor de imanes permanentes [17]

Si se considera un rotor con imanes permanentes, no se necesita inducir un campo magnético en el rotor, como en el caso del motor de inducción. Esto evita pérdidas y calentamiento en el rotor. A causa de esto, los motores de imanes permanentes son actualmente los más pequeños y livianos.

Como el rotor está magnetizado, siempre está en sincronismo con el estator, con lo cual los motores de imanes permanentes entran dentro de la categoría de motores síncronos.

• Ventajas:

- Liviano y pequeño.
- Silencioso.
- Eficiente, especialmente a bajas velocidades.
3.2. Componentes de un vehículo eléctrico

- Desventajas:
 - Los imanes permanentes son costosos, no amigables para el medio ambiente y se pueden desmagnetizar.
 - Necesita mecanismo de arranque.
- 3.2.2.4. Motor sincrónico de reluctancia variable



Figura 3.8: Motor sincrónico de reluctancia [18]

El motor síncrono de reluctancia es uno de los de mayor desarrollo actual. El mismo en su rotor tiene un metal que esta realizado en cierta forma geométrica tal que intenta alinearse naturalmente con el campo magnético del estator. Esto implica que no necesita inducir corrientes desde el estator, como el motor de inducción, y además tampoco necesita imanes permanentes, lo cual lo hace más económico que el motor de imanes permanentes.

- Ventajas:
 - Torque comparable con el motor de imanes permanentes.
 - Eficiente a altas velocidades.
 - Económico y limpio de producir (no necesita imanes permanentes).
- Desventajas:
 - Baja eficiencia en bajas velocidades.
 - Mayor ruido y ripple en el torque (aunque cada vez es más amortiguado por el avance en los controladores).

3.2.2.5. Motor sincrónico con rotor bobinado

La máquina síncrona está compuesta básicamente de una parte activa fija que se conoce como estator (generalmente es el inducido) y de una parte giratoria coaxial que se conoce como rotor (generalmente el inductor). El espacio comprendido entre el rotor y el estator, es conocido como entrehierro. Esta máquina tiene la particularidad de poder operar ya sea como generador o como motor. Su operación como generador se realiza cuando se aplica un voltaje de corriente continua en el campo de excitación del rotor y a su vez éste es movido o desplazado por un motor externo hasta llegar a la velocidad de sincronismo, lo que da lugar a tener un campo magnético giratorio que atraviesa a los conductores del estator, induciendo con esto un voltaje entre los terminales del estator. Su operación como motor síncrono se realiza cuando el estator es alimentado con un voltaje trifásico alterno y consecutivamente el rotor es alimentado con un voltaje continuo.

• Ventajas:

- Velocidad constante proporcional a la frecuencia de alimentación del estator.
- Factor de potencia ajustable mediante la excitación del rotor, de tal forma que puede actuar con factor de potencia unitario ó como compensador sincrónico.
- Mayor resistencia a las sobrecargas.

Desventajas:

- Controladores complejos que tienen mayor costo.
- Llevar el rotor a la velocidad de sincronismo.

3.2.2.6. Vehículos eléctricos según tipo de motor

De manera de enriquecer el análisis de los distintos motores disponibles para aplicaciones en vehículos eléctricos, en la tabla 3.4 se indicará cuáles son los tipos de motores utilizados por los distintos vehículos eléctricos que forman parte del mercado actual.

3.2. Componentes de un vehículo eléctrico

Fabricante	Modelo	Año	Tipo de motor utilizado	
BYD	E6	2014	Síncrono de Imanes Permanentes [19]	
BYD	Т3	2018	Síncrono de Imanes Permanentes [20]	
BMW	i3	2014	Síncrono de Imanes Permanentes [21]	
Chevrolet	Spark EV	2015	Síncrono de Imanes Permanentes [21]	
Chevrolet	Bolt	2017	Síncrono de Imanes Permanentes [16]	
Fiat	500e	2015	Síncrono de Imanes Permanentes [21]	
Ford	Focus EV	2015	Síncrono de Imanes Permanentes [21]	
Honda	Fit EV	2014	Síncrono de Imanes Permanentes [21]	
JAC	S2	2018	Síncrono de Imanes Permanentes [22]	
Kia	Soul EV	2015	Síncrono de Imanes Permanentes [21]	
Mitsubishi	i-MiEV	2014	Síncrono de Imanes Permanentes [21]	
Nissan	Leaf	2015	Síncrono de Imanes Permanentes [21]	
Renault	Kangoo	2014	Síncrono de rotor bobinado [23]	
Renault	Zoe	2018	Síncrono de rotor bobinado [24]	
Tesla	Model S	2015	Motor de Inducción [21]	
Toyota	RAV 4 EV	2014	Motor de Inducción [21]	
Volkswagen	e-up!	2013	Síncrono de Imanes Permanentes [21]	

Tabla 3.4: Distintos tipos de motores utilizados en vehículos eléctricos actuales.

Como se puede apreciar, la tendencia indica una preferencia por los motores síncronos de imanes permanentes. Los principales motivos de esta preferencia son la alta densidad de potencia y alta eficiencia, lo cual puede disminuir el consumo de energía y mejorar la autonomía [25].

3.2.3. Convertidores



Figura 3.9: Entrada y salida de un convertidor genérico de electrónica de potencia con sus componentes internos [26]

Como se mencionó en 3.2.1, un convertidor que utiliza electrónica de potencia es un dispositivo que contiene switches semiconductores de alta potencia, y mediante los diferentes estados de conmutación de los mismos, cambia la forma de onda y magnitud del voltaje y corriente de la salida en comparación a la entrada. La figura 3.9 representa un convertidor de electrónica de potencia.

Los interruptores de potencia más comúnmente utilizados son los MOSFETs (power Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors) y los IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors). Además, en los convertidores es necesario tener bobinas, diodos, disipadores de calor y capacitores.

Existen cuatro tipos de convertidores de potencia.

- Convertidor DC/DC
- Convertidor DC/AC (Inversor)
- Convertidor AC/DC (Rectificador)
- Convertidor AC/AC

Los convertidores pueden ser con flujo de potencia bidireccional, y/o tener aislación magnética entre la entrada y la salida.



Figura 3.10: Esquema genérico del tren de conducción y los convertidores de electrónica de potencia [26]

En la figura 3.10 se observa en el tren de conducción los diferentes componentes eléctricos del vehículo, los mismos incluyen conversores DC/DC, DC/AC, y AC/DC. Para regular la potencia entre la batería y el motor es necesario utilizar un convertidor de potencia.

La batería es una fuente DC, que entrega corriente con un voltaje particular. Cuando la potencia fluye hacia la batería, ya sea cuando se está cargando desde la red o se está utilizando el frenado regenerativo (cuando el vehículo va desacelerando sin presionar el freno, el mismo se va frenando magnéticamente y genera una corriente entrante a la batería que recarga la misma), se debe asegurar que el voltaje sea el adecuado, para no dañar la batería. Análogamente, cuando el flujo de potencia es

3.2. Componentes de un vehículo eléctrico

hacia el motor, se debe de asegurar que el voltaje que se le inyecta sea el adecuado, para así evitar dañarlo y que la máquina provea la potencia óptima para mover el vehículo.



Figura 3.11: Componentes típicos de electrónica de potencia en un VE [26]



Figura 3.12: Flujo de potencia desde el motor hacia la batería y viceversa [26]

Las figuras 3.11 y 3.12 muestran el diseño típico de los componentes de electrónica de potencia en un VE. La batería auxiliar suministra la potencia necesaria para utilizar los servicios auxiliares del VE y para el arranque. Desde la red se suministra potencia hacia el vehículo en forma de corriente y voltaje alterna. La misma se rectifica y luego se acondiciona para ingresar a la batería.

Para que la potencia fluya hacia el motor, desde la batería se eleva el voltaje con el conversor bidireccional DC/DC y luego se acondiciona mediante un conversor DC/DC ó DC/AC dependiendo del tipo de motor que se utilice. Análogamente, si se utiliza el frenado regenerativo, el flujo de potencia se acondiciona desde el motor pasando por el conversor y luego se reduce el voltaje para cargar la batería. En el último paso, para comenzar el movimiento del vehículo, desde el motor hacia las ruedas hay una relación de transmisión reductora de velocidad, para que en las ruedas haya mayor torque que en el motor.

3.2.4. Baterías

Dado que uno de los ejes centrales del proyecto es el estudio de las baterías, se destinará el capitulo 4 exclusivamente para desarrollar el tema. En dicho capítulo se estudiará la composición básica de una celda, así como también el funcionamiento durante una carga y descarga. También se desarrollarán las diferentes químicas existentes, evaluando sus diferentes usos y realizando comparaciones.

Por ultimo se abarcará el tema particular de las baterías de litio, sus diferentes formas constructivas y químicas de aplicación actual en los VE.

3.3. Carga en AC y DC

En la presente sección se desarrollan los diferentes tipos de cargas más utilizadas para los VE (en AC y DC).

A su vez se analizan los distintos cargadores que se utilizan para cada tipo de carga, estudiando su interacción con el VE y sus diferentes formas físicas.

Existen tres modos diferentes de carga para los vehículos eléctricos.

- Carga conductiva mediante un cable físico.
- Carga mediante inducción.
- Recambio de baterías.

Las secciones 3.3.2 y 3.3.3 se centrarán en el estudio de la carga conductiva mediante cable físico.

3.3.1. Pines de control

En esta sección se describen los pines de control utilizados en los diferentes tipos de conectores.



Figura 3.13: Pines de señal para los conectores tipo 1 y 2 [27]

Los conectores tipo 1 y 2 tienen dos pines de comunicación en común: el pin de control (CP) y el pin de proximidad (PP).

Proximity Pilot (PP)

El pin de proximidad (Proximity Pilot (PP)) chequea tres estados del conector; si está conectado, si lo están desconectando, o si no está conectado.



Figura 3.14: Diagrama del circuito equivalente para el pin de proximidad. Extraído de la norma IEC 61851-1, año 2017. [28]

	Value	Tolerance				
R4 ^a	330 Ω	± 10 %				
R5 ^a	2 700 Ω	± 10 % copie				
R6	150 Ω	± 10 % ≥ 0,5 W				
R7	330 Ω	± 10 % ≥ 0,5 W				
+V DC ^{a,c}	5V	en con ± 5 %				
a These are recommended values.						

Table B.1 – Component values proximity circuit without current coding

Figura 3.15: Tabla B.1 referenciada en la norma IEC 61851-1. [29]

La figura 3.14 muestra el circuito equivalente que utiliza el pin de proximidad para detectar si el conector está enchufado, se está desenchufando, o si está desconectado. Para esto, lo que se hace es un divisor de tensión, evaluando el voltaje que se obtiene en bornes de la resistencia R5.

3.3. Carga en AC y DC

No conectado





El divisor de tensión en este caso queda como se observa en la figura 3.16 y se obtiene un voltaje de 4.5V, el cuál indica que el conector está desenchufado.

Botón presionado



Figura 3.17: Circuito equivalente de 3.14 al presionar el botón en el conector.

El divisor de tensión en este caso que da como se observa en la figura 3.17 y se obtiene un voltaje de 3.0V, el cual indica que el conector se está desenchufando.

Conectado



Figura 3.18: Circuito equivalente de 3.14 al conectar el cable entre el vehículo y el SAVE.

El divisor de tensión en este caso queda como se observa en la figura 3.18 y se obtiene un voltaje de 1.5V, el cuál indica que el conector está enchufado.

• Control Pilot (CP)

El segundo pin es el de control (Control Pilot (CP)), y es utilizado para controlar la corriente de carga. La estación de carga manda un pulso PWM de 1 kHz de \pm 12 V por el CP el cual llega al VE. En este sentido, le avisa al vehículo la máxima corriente que puede ser obtenida desde la estación de carga, llámese I_{max} . El vehículo puede pedir una corriente deseada I_{ac} siempre y cuando sea menor que la corriente I_{max} .

La figura 3.13 muestra un esquema de dicha lógica.

3.3.2. Carga AC

La carga en corriente alterna permite que los vehículos sean cargados utilizando estaciones de carga no demasiado complejas, las cuales se alimentan directamente desde la red. Las mismas no son demasiado complejas debido a que la electrónica de potencia que se encarga de pasar el voltaje en alterna a continuo y regularlo, se encuentra dentro del vehículo eléctrico, y se denomina "on board charger (cargador a boro)". El cargador a bordo debe ser compacto y liviano (típicamente menor a 5kg), para no ocupar mucho espacio del vehículo. Esto introduce una limitante en la potencia máxima a la cuál puede ser cargada la batería del VE en AC.

La figura 3.19 muestra el esquema vehículo - cargador en AC.



Figura 3.19: Esquema Vehículo - Estación de carga en AC [27]

A continuación se explica más en profundidad los componentes del cargador y la electrónica de potencia del vehículo.



Figura 3.20: Estación de carga en AC - Electrónica de potencia en el VE [27]

Cuando la estación de carga y el vehículo se interconectan, los pines de control PP y CP aseguran el enclavamiento mecánico del conector, y limitan la máxima corriente que es capaz de entregar el SAVE (Sistema de Alimentación del Vehículo Eléctrico) respectivamente. En la sección 3.3.1 se detallarán dichos pines.

El vehículo internamente tiene un rectificador que pasa la señal de alterna a continua, y luego la acondiciona a un voltaje y corriente adecuados mediante un conversor DC/DC, el cuál es controlado por la unidad de control de potencia. El controlador obtiene datos desde el Battery Managment System (BMS) para controlar el voltaje y corriente de carga de la batería. Además, hay un circuito de protección que en caso de que los límites de la batería sean excedidos, aísla automáticamente a la misma para protegerla.

Lo anterior se observa en la figura 3.20.

3.3.2.1. Conectores AC

La industria de los VE no se ha puesto de acuerdo en crear un sólo tipo de conector, con lo cual, dependiendo en el tipo de auto y país, el conector puede variar en forma, tamaño y en pines de configuración. Una de las principales razones de estas diferencias es por el voltaje y frecuencia que se utiliza en cada país. Mundialmente, hay 4 tipos de conectores utilizados.

• Tipo 1: Usualmente usado en Estados Unidos y Japón

- Tipo 2: Usualmente utilizado en Europa (y en el caso nuestro es el que se utiliza en Uruguay)
- Tipo 3: Tesla utiliza su propio conector.
- Tipo 4: China tiene su propio conector AC, el cual es similar al conector AC tipo 2.

A continuación se describen algunos de estos conectores.

Conector AC Tipo 1:



Figura 3.21: Conector AC tipo 1. Utilizado en EE.UU y Japón [27]

La figura 3.21 muestra el conector tipo 1. Este conector es normalmente conocido como Yazaki ó J1772. Tiene 5 pines, dos de ellos son pines AC, en el cuál se le ingresa el voltaje fase-fase ó fase-neutro. Otro pin es el de tierra. Los dos pines restantes son para el controlador. El pin de proximidad asegura que el conector esté conectado correctamente, y el pin de control limita la corriente máxima que puede entregar el SAVE.

Este tipo de conector admite una corriente de hasta 80 A, tanto para voltajes de 120 V como 240 V.

Conector AC Tipo 2:



Figura 3.22: Conector AC tipo 2. Utilizado en Europa y Uruguay [27]

La figura 3.22 muestra el conector tipo 2.

El conector tiene 7 pines. Cinco de ellos son pines de potencia, tres son los pines AC de cada fase (L1, L2, L3), luego tiene otro pin que es el neutro (N), y uno de tierra (PE). Además tiene dos pines de control, que tienen la misma funcionalidad que los pines de control del conector tipo 1. El conector puede ser utilizado para carga monofásica o trifásica indiferentemente. El pin de proximidad asegura que

el conector esté conectado correctamente, y el pin de control es para controlar la corriente máxima que se le puede entregar a la batería.

Este tipo de conector admite una corriente de hasta 83 A para una carga monofásica de 230 V, y una corriente de 63 A para una carga trifásica de 400 V.

Conector Tesla:



Figura 3.23: Conector AC Tesla [27]

Estos conectores tienen la particularidad que sirven tanto para carga AC como DC. Además existe un adaptador que los hace compatibles con el cargador tipo 1. El conector consiste en dos pines pequeños de señal, y tres pines de Potencia, que combinan carga AC y DC. Los tres pines de potencia son uno de fase (L1), neutro (N) y tierra (PE). Éste conector es sólo para carga monofásica y no admite carga trifásica.

Este tipo de conector admite hasta 72 A para un voltaje de 240 V AC, lo que equivale aproximadamente a 17.2 kW.

3.3.3. Carga DC



Figura 3.24: Tamaños estaciones de carga DC y AC [30]

La carga rápida en DC tiene un rango de potencia de salida de aproximadamente 50 kW hasta 350 kW. Debido a este rango de potencias elevadas, los cargadores DC son costosos y de mayor tamaño (ya que toda la electrónica de potencia está integrada en el cargador DC para pasar de alterna a continua), comparados con los cargadores AC.

La figura 3.24 ilustra la diferencia de tamaños entre una estación de carga DC y una AC.

3.3.3.1. Operación carga DC



Figura 3.25: Operación carga DC [30]

En el primer paso, la corriente AC que es proporcionada por la red hasta la estación de carga, es rectificada dentro de la estación de carga.

Luego, la unidad de control de potencia se encarga de acondicionar el voltaje y corriente de salida del conversor DC/DC dentro de la estación de carga, para que a la batería le lleguen la corriente y voltaje necesarios.

Además hay un bloqueo de seguridad y circuitos de protección, para desenergizar el conector del vehículo eléctrico y parar el proceso de carga en el caso que haya una falta o una conexión errónea entre el VE y el cargador.

El BMS (Battery Managment System) tiene un rol muy importante, y es el que se encarga de comunicarle a la estación de carga que voltaje y corriente necesita la batería. También es el encargado de operar los circuitos de protecciones en caso de alguna anomalía.

Lo anterior puede observarse en la figura 3.25

3.3.3.2. Conectores DC

Hay 5 tipos de conectores para carga DC utilizados globalmente.

- CCS (Combined Charging System) Combo 1, el cuál es utilizado comúnmente en Estados Unidos.
- CCS (Combined Charging System) Combo 2, el cuál es utilizado comúnmente en Europa
- El conector CHAdeMO, que es usado globalmente en vehículos creados por empresas Japonesas.

- Conector Tesla DC, que es el mismo que se utiliza en carga AC.
- China tiene su propio conector, basado en su propio estándar GB/T

CCS - Combo 1:



Figura 3.26: Izquierda: Conector CCS - Combo 1 de la estación de carga. Derecha: Conector CCS - Combo 1 hembra en el vehículo. [30]

El conector CCS combo 1 se caracteriza por tener en el vehículo un sólo conector hembra, que sirve tanto para cargas AC como DC. Esto se puede observar en la figura 3.26. Además, la estación de carga tiene en el mismo conector para elegir entre carga AC o DC.

Por otro lado, el conector hembra en el vehículo mantiene exactamente los mismos pines de AC que el conector Tipo 1 de corriente alterna, y se le agregan dos entradas de potencia para la carga rápida en DC. Por lo cuál, el vehículo es compatible con el conector de la estación AC Tipo 1.

CCS - Combo 2:



Figura 3.27: Izquierda: Conector CCS - Combo 2 de la estación de carga. Derecha: Conector CCS - Combo 2 hembra en el vehículo. [30]

El conector CCS combo 2 es análogo al combo 1, con la diferencia que el conector de la estación del combo 2 tiene solo carga rápida en DC. Si se quiere

cargar en AC, se debe conectar el conector tipo 2 que es compatible. Esto se puede observar en la figura 3.27.

Voltajes y corrientes máximas de los CCS - Combo 1 y 2:

En general, los cargadores CCS pueden tener una corriente de hasta 350 A con un voltaje entre 200 V y 1000 V, con una potencia máxima de 350 kW. Hay que tener en cuenta que estos valores son constantemente actualizados con el avance de la tecnología en los VE.

CHAdeMO:



Figura 3.28: Conector CHAdeMO. [30]

El conector CHAdeMO, como se observa en la figura 3.28, consiste en 9 pines, 3 de los cuáles son de potencia (DC+, DC-, tierra), y 6 de señal.

Se observa que el conector superior tiene 4 espacios para pines, pero sólo se utilizan 3, el 4to pin que esta vacío está hecho para robustez mecánica. El conector CHAdeMO, a diferencia de otros cargadores, tiene comunicación CAN (Controller Area Network), que es una conexión robusta designada para permitir que los microcontroladores y dispositivos se comuniquen entre sí en aplicaciones sin una computadora anfitriona.

Voltajes y corrientes máximas CHAdeMO:

El voltaje en los conectores CHAdeMO ronda entre los 50 V y los 500 V, con una corriente máxima de 400 A, lo que equivale una potencia máxima de 200 kW. En el futuro se espera que el voltaje se pueda elevar hasta 1000 V, con lo cual la potencia máxima pasaría a ser 400 kW.

Conector Tesla



Figura 3.29: Conector TESLA. [30]

El conector Tesla tiene su propio diseño utilizado en los Estados Unidos, mientras que en Europa, utiliza el conector Tipo 2 de AC, con la salvedad que en los pines de potencia se le inyecta DC, como se observa en la figura 3.29.

Los conectores Tesla DC, como los AC, tienen tres pines de potencia, y dos de comunicaciones.

Voltajes y corrientes máximas Tesla

Al momento los conectores Tesla están limitados a 120 kW.

Conector Chino basado en el estándar GB/T



Figura 3.30: Conector Chino basado en el estándar GB/T. [30]

China tiene su propio conector DC, el cual utiliza bus CAN (Controller Area Network) para comunicaciones. La particularidad de éste cargador, es que en el

mismo conector, carga la batería de alto voltaje de tracción del auto, y también carga la batería de bajo voltaje de servicios auxiliares. Con lo cuál, éste cargador tiene 5 pines de potencia (2 de alto voltaje, 2 de bajo voltaje, y el de tierra), y tiene 4 pines de señal (2 para el piloto de proximidad, y dos para la comunicación CAN).

Esto se puede observar en la figura 3.30.

Voltajes y corrientes máximas conector Chino

Por ahora los voltajes nominales son 750 V o 1000 V, y la corriente puede llegar hasta 250 A, con lo cuál se puede obtener una potencia máxima de hasta 250 kW.

3.3.3.3. Limitaciones de la carga rápida

La carga rápida es muy atractiva, ya que en base a su gran potencia puede cargar al vehículo en un periodo corto de tiempo. Pero la potencia de la carga en DC no se podrá incrementar infinitamente. Esto es debido a las siguientes consecuencias:

- Incrementar la corriente de carga lleva a tener mayores pérdidas en el cargador y en la batería.
- Con la carga rápida aumenta la corriente de carga, y esto produce que la vida útil de la batería se reduzca, ya que aumenta la temperatura en los conductores y en la batería debido al efecto Joule.
- En cualquier cargador, es importante que el cable sea liviano y flexible, para que las personas los puedan usar cómodamente. Con el aumento de la potencia de carga, se van a precisar cables con mayor sección, para que sea seguro su uso con corrientes elevadas. Esto puede llevar a que los cables sean excesivamente pesados o complicados de utilizar. Una posible solución a esto sería usar sistemas de refrigeración en los cables sin tener que aumentar su sección, para asegurar que los cables no se calienten demasiado. Esto llevaría a tener que invertir mas capital en los cargadores y que sean mas complejos.

Capítulo 4

Baterías

Uno de los focos centrales de este proyecto es realizar un software que permita simular la gestión de las baterías de los vehículos eléctricos. Luego de haber presentado los componentes generales de los vehículos eléctricos, se procede en este capítulo a investigar sobre las baterías.

Se estudiarán en el presente capítulo los conceptos generales sobre baterías, las unidades básicas (o celdas) y los componentes de las mismas. Se presentan conceptos sobre su funcionamiento. Se mencionan los parámetros fundamentales y de la clasificación según su química.

Luego se presentan algunas de las químicas de baterías presentes en el mercado y la conveniencia de su uso para algunas aplicaciones, llegando a los tipos de batería que tienen aplicaciones para VEs.

Finalmente se trabaja particularmente sobre las baterías de Litio en sus diferentes químicas, que serán las que mejor se adapten a las solicitudes del VE.

4.1. Conceptos generales sobre baterías

Una batería es un dispositivo que convierte la energía química contenida en sus materiales activos en energía eléctrica por medio de una reacción electroquímica de reducción-oxidación (redox). En el caso de una batería recargable, el proceso inverso carga la batería. Este tipo de reacción implica la transferencia de electrones de un material a otro a través de un circuito eléctrico. En una reacción redox no electroquímica, como oxidación o quema, la transferencia de electrones se produce directamente y solo interviene el calor. Como la batería convierte electroquímicamente la energía química en energía eléctrica, no está sujeta a las limitaciones del ciclo de Carnot dictadas por la Segunda Ley de la Termodinámica [31]. Las baterías, por lo tanto, son capaces de tener mayores eficiencias de conversión de energía.

Si bien el término "batería" se usa a menudo, la unidad electroquímica básica es llamada "celda". Una batería consta de una o más de estas celdas, dispuestas en serie, en paralelo, o en la combinación de ambas, según el voltaje y la capacidad de salida que se deseen obtener.

Capítulo 4. Baterías

4.1.1. Unidad básica o celda

La celda es la unidad electroquímica básica que proporciona una fuente de energía eléctrica a través de la conversión directa de energía química. Consiste en un conjunto de electrodos, separadores, electrolitos, contenedores y terminales. Una batería puede estar compuesta por una o más celdas electroquímicas, conectadas eléctricamente en una disposición apropiada (composición de series y paralelos de celdas) de manera de proporcionar la tensión de funcionamiento y los niveles de corriente requeridos.

Una celda consta de tres componentes principales, ánodo, cátodo y electrolito, como se muestra en la figura 4.1:



Figura 4.1: Ánodo, cátodo y electrolito en una batería [32]

- 1. El **ánodo** o electrodo negativo, es el electrodo reductor o de combustible, que cede electrones al circuito externo y se oxida durante la reacción electroquímica.
- 2. El **cátodo** o electrodo positivo, es el electrodo oxidante, que acepta electrones del circuito externo y se reduce durante la reacción electroquímica.
- 3. El **electrolito**, es el conductor iónico, que proporciona el medio para la transferencia de carga, como iones, dentro de la celda entre el ánodo y el cátodo. El electrolito es típicamente un líquido, como agua u otros solventes con sales disueltas, ácidos o álcalis para aumentar la conductividad iónica. Algunas baterías utilizan electrolitos sólidos, que son conductores iónicos en la temperatura de funcionamiento de la celda.

En un sistema práctico, el **ánodo** se elige teniendo en cuenta las siguientes propiedades: eficiencia como agente reductor, una buena relación de capacidad masa (Ah/g), buena conductividad, estabilidad, facilidad de fabricación y bajo costo. En la práctica, se utilizan principalmente metales como material de ánodo. El zinc ha sido un ánodo predominante porque tiene estas propiedades favorables. El litio, el metal más ligero, con un alto valor de equivalencia electroquímica, se ha convertido en un ánodo muy atractivo, adecuado y compatible

4.1. Conceptos generales sobre baterías

El **cátodo** debe ser un agente oxidante eficiente, debe ser estable cuando esté en contacto con el electrolito, y debe tener una tensión de trabajo útil. Los óxidos metálicos son utilizados como cátodo en la mayoría de las aplicaciones, pero incluso el oxígeno del aire podría ser utilizado como cátodo. Otros materiales catódicos, como los halógenos, los oxihaluros, azufre y sus óxidos, se utilizan para sistemas de baterías especiales.

El electrolito debe tener una buena conductividad iónica pero no debe ser electrónicamente conductor, ya que esto provocaría un cortocircuito interno. Es importante también que no sea reactivo con los materiales del electrodo, que las variaciones en temperatura no lo alteren, que su manejo sea seguro y que tenga un bajo costo. La mayoría de los electrolitos son soluciones acuosas, pero hay importantes excepciones como, por ejemplo, en baterías térmicas y de ánodo de litio, donde la sal fundida y otras soluciones no acuosas se utilizan para evitar la reacción del ánodo con el electrolito.

Físicamente, los electrodos de ánodo y cátodo se aíslan electrónicamente en la celda para evitar cortocircuitos internos, pero están rodeados por el electrolito. En los diseños de celda prácticos, se utiliza un material "separador" para separar mecánicamente los electrodos de ánodo y de cátodo. El separador, sin embargo, es permeable al electrolito para mantener la conductividad iónica deseada.

La celda puede construirse en muchas formas (cilíndrica, forma de botón, plana, prismática) y configuraciones (los componentes de la celda están diseñados para adaptarse a la forma particular de la celda). Las celdas están selladas en una variedad de formas para evitar fugas y el secado de las mismas. Algunas cuentan con dispositivos de ventilación u otros medios para permitir que los gases acumulados se escapen. Se añaden estuches o contenedores adecuados, medios para la conexión de la terminal y el etiquetado para completar la fabricación de la celda y de la batería [31].

4.1.2. Clasificación de celdas o baterías

Las celdas o baterías se pueden clasificar según sean recargables (baterías o celdas secundarias) o sólo para descarga (baterías o celdas primarias).

Baterías primarias: Estas baterías no están diseñadas para ser recargadas, por lo tanto, deben ser desechadas luego de su descarga. Generalmente son baratas y livianas, características que las hacen atractivas para múltiples aplicaciones. Algunos ejemplos de uso son la alimentación de dispositivos portátiles, de iluminación, equipos fotográficos, juguetes, dispositivos de memoria, y una gran variedad de aplicaciones. Las mayores ventajas son una buena vida útil, una alta densidad de energía (siempre que se les extraiga corriente en tasas de bajas a moderadas), poco o ningún mantenimiento y facilidad de uso. Se utilizan baterías primarias de gran capacidad en aplicaciones militares, de señalización, para alimentación de respaldo, entre otras.

Capítulo 4. Baterías

Las más conocidas son las baterías primarias cilíndricas ("pilas" no recargables), también son conocidas las pilas planas de botón y pilas multi-celdas utilizando estas celdas básicas como componentes.

Baterías secundarias: Estas baterías pueden cargarse y descargarse eléctricamente. La recarga se realiza mediante la circulación de corriente en el sentido opuesto al de la descarga. Son conocidas como dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica y también se conocen como "acumuladores". Las aplicaciones de las baterías secundarias se pueden dividir en dos categorías principales. Cuando se utilizan esencialmente como baterías primarias y luego se recargan para volver a utilizar, y cuando se utilizan como dispositivos de almacenamiento de energía o "acumuladores". Los acumuladores son generalmente cargados por una fuente de energía principal para luego volcar la energía almacenada hacia las cargas cuando sea necesario o conveniente. Algunos ejemplos de aplicación son los bancos de baterías de respaldo o de reserva, las UPS, entre muchas otras.

Las baterías secundarias se caracterizan (además de su capacidad para ser recargadas) por alta densidad de potencia, alta tasa de descarga y curvas de descarga planas. Sus densidades de energía suelen ser más bajas que de las baterías primarias. La retención de carga también es menor que la de la mayoría de las primarias, sin embargo, la capacidad perdida de las baterías secundarias puede restablecerse mediante recarga.

4.1.3. Funcionamiento de la celda

Se distinguen dos funcionamientos básicos de la celda o de la batería, la carga y la descarga.

Descarga de la celda

Cuando la celda es conectada para alimentar una carga externa, los electrones fluyen desde el ánodo, que se "oxida", a través de la carga externa y hacia el cátodo, que es el material que se "reduce". El circuito eléctrico se completa con el electrolito que permite la circulación de aniones (iones negativos) y cationes (iones positivos) hacia el ánodo y el cátodo respectivamente. El proceso puede observarse en la figura 4.2.

4.1. Conceptos generales sobre baterías



Figura 4.2: Descarga de una celda [31]

Carga de la celda

Al cargar la celda, el flujo de corriente es contrario al de la descarga. La oxidación sucede en el electrodo positivo y la reducción en el negativo, como se puede apreciar en la figura 4.3. Como el ánodo es por definición el electrodo en el que sucede la oxidación y el cátodo el que se reduce, el borne positivo pasa a ser el ánodo y el negativo el cátodo.



Figura 4.3: Carga de una celda [31]

Capítulo 4. Baterías

4.2. Parámetros de las baterías

Las baterías, independientemente de su composición química, tiene ciertas especificaciones y parámetros que las caracterizan. Los parámetros más comunes y que brindan datos relevantes a la hora de elegir una batería para una aplicación determinada son:

- 1. Tensión de celda (V).
- 2. Tensión de la batería (V).
- 3. Tensión de circuito abierto OCV (V).
- 4. Capacidad Nominal (Ah).
- 5. Tasa de descarga/carga C_{rate}
- 6. Energía (Wh).
- 7. Energía específica. $\left(\frac{Wh}{kg}\right)$.
- 8. Densidad energética. $\left(\frac{Wh}{l}\right)$.
- 9. Potencia específica. $\left(\frac{W}{kg}\right)$.
- 10. Estado de carga SOC (%).
- 11. Profundidad de descarga Do
D(%).
- 12. Estado de Salud SOH (%).
- 13. Resistencia Interna (Ω) .
- 14. Autodescarga.
- 15. Eficiencia carga/descarga (%).
- 16. Durabilidad (Ciclos de vida).

A continuación se desarrolla el significado de cada parámetro:

1. Tensión de la celda (V)

La tensión es función de la configuración de la batería, esto es, del tipo de electrodos y de electrólito seleccionados para su construcción. La tensión es máxima cuando la batería está a plena carga y es mínima cuando está totalmente descargada.

2. Tensión de la batería (V)

La tensión de la batería resulta de la suma de las tensiones de las celdas en serie que compongan la batería.

4.2. Parámetros de las baterías

3. Tensión de circuito abierto - OCV (V)

Es la tensión que se tiene en bornes de la batería cuando se encuentra en reposo y sin carga externa conectada.

4. Capacidad Nominal (Ah)

La capacidad nominal es la cantidad de carga eléctrica que puede entregar la batería durante un tiempo de descarga específico, por lo que sus unidades son los Ah (*Amperios.hora*). Usualmente, si no se expresa el tiempo de descarga explícitamente se toma que el tiempo de descarga es de una hora (se expresa como C_1). Una descarga de 26 Ah con C_1 indicaría que la batería es capaz de entregar 26 A durante 1 hora.

5. Tasa de descarga/carga - C_{rate}

La tasa de descarga/carga o C_{rate} es la velocidad con que se descarga o carga a la batería respecto a su corriente nominal. Por ejemplo una descarga a un 10 % de la corriente nominal de cierta batería se indica como $C_{rate} = 0.1C$

6. Energía nominal (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 a plena carga.

$$E(Wh) = C(Ah).V(V)$$

7. Energía especifica $\left(\frac{Wh}{kg}\right)$

La energía especifica expresa la energía (Wh) que es capaz de almacenar un kilogramo (kg) de la batería. En otras palabras, por cada Kg de masa, la batería es capaz de almacenar cierta cantidad de energía en Wh, por lo tanto, la energía específica se expresa en $\frac{Wh}{kg}$.

8. Densidad de energía $\left(\frac{Wh}{l}\right)$

La densidad energética representa la cantidad de energía que es capaz de acumular la batería por unidad de volumen.

9. Potencia específica $\left(\frac{W}{Kq}\right)$

Es la potencia que la batería es capaz de entregar por unidad de masa.

10. Estado de carga - SOC (%)

El estado de carga o SOC (por sus siglas en inglés State of Charge) es la capacidad disponible de la batería en función de su capacidad real. Se expresa en porcentaje.

11. Profundidad de descarga - DoD (%)

El DoD (Depth of Discharge) o profundidad de descarga es la capacidad utilizada de una batería en función de su capacidad máxima actual. Depende del estado de carga inicial y final.

Capítulo 4. Baterías

 $DoD(\%) = SOC(\%)_{inicial} - SOC(\%)_{final}$

12. Estado de Salud - SOH (%)

Viene del término en inglés State of Health (SOH). El estado de salud determina la condición o capacidad de funcionamiento actual de la batería en función de la capacidad nominal o inicial (nueva). Se obtiene realizando el cociente entre la capacidad actual y la inicial.

13. Resistencia Interna (Ω)

Es la resistencia generada por la oposición al paso de la corriente eléctrica. Es provocada por los materiales constructivos que forman a la batería.

14. Auto-descarga (%/mes)

La auto-descarga es un fenómeno en el que ocurren reacciones químicas internas que reducen la energía almacenada en la batería sin que haya conexión alguna (la batería no está en funcionamiento). Depende entre otros del SOH y de la temperatura. Generalmente se da en% de auto-descarga respecto a su energía nominal por unidad de tiempo (mes).

15. Eficiencia (%)

Es la relación entre la energía útil que se puede extraer de una batería y la energía utilizada para realizar una carga completa (desde el 0% al 100%).

16. Durabilidad (Ciclos de vida)

La durabilidad de la batería representa la vida útil de la misma en función del número de ciclos de carga y descarga. Generalmente viene expresada en número de ciclos a cierta profundidad de descarga, por ejemplo, 2000 ciclos a un DOD de un 80 %, brinda la información de que si se descarga la batería hasta un 20 % (de carga remanente) y la volvemos a cargar hasta el 100 %, la misma dura al menos 2000 ciclos.

4.3. Clasificación de baterías según su química

Al elegir una batería para una aplicación particular, se deben considerar todas las opciones que se tengan en el mercado. Hoy día hay muchas químicas de baterías disponibles. Entre ellas se pueden mencionar, por ejemplo:

- Baterías de plomo-ácido
- Baterías de níquel-cadmio (NiCd)
- Baterías de níquel-hierro (NiFe)
- Baterías de níquel-hidruro metálico (NiMH)
- Baterías de iones de litio (Li-ion)(LiCOO2)(LiNiO2)
- Baterías de fosfato de litio (LiFePO4)

4.3. Clasificación de baterías según su química

- Baterías de polímero de litio (LiPo)
- Baterías ZEBRA (sales fundidas)
- Baterías de aluminio-aire (FC)
- Baterías de zinc-aire

En las siguientes sub-secciones se explicarán las características principales de los diferentes tipos de química que conforman a las baterías.

4.3.1. Baterías de plomo ácido

Las baterías de plomo ácido han tenido éxito en el mercado durante más de un siglo. Su utilización aún sigue creciendo y han sido utilizadas en múltiples aplicaciones. Sus ventas representaban en el año 1999 aproximadamente el 45 % del valor de venta de todas las baterías en el mundo. Entre otros usos se pueden mencionar alimentación de sistemas de respaldo de energía, de vehículos eléctricos (e híbridos), de herramientas, de dispositivos de comunicación, de sistemas de iluminación, del arranque de los motores de vehículos a combustión, de equipos de minería, entre muchos otros.

El amplio uso de la batería de plomo-ácido en sus tantos diseños, tamaños y tensiones se explican por el bajo costo y la facilidad de fabricación. La batería de plomo-ácido es casi siempre la batería de almacenamiento más económica para cualquier aplicación, a la vez que ofrece buenas características de rendimiento y vida.

Principales ventajas de las baterías de plomo ácido

- Bajo costo para el consumidor.
- Gran variedad de tamaños, formas y diseños. Hay disponibilidad de una amplia gama de capacidades y tensiones.
- Puede elaborarse en cualquier parte del mundo y a pequeña escala.
- Buena performance para aplicaciones en arranques de motores de combustión donde se han establecido como las baterías predominantes (incluso cuando podrían haber químicas más idóneas).
- Funciona bien a temperaturas moderadamente altas y bajas.
- Eficiencia eléctrica de un 70% (energía de carga vs de descarga). Alto voltaje de celda. Con tensiones de circuito abierto de hasta 2.0 V que es el más alto de todos los sistemas de baterías de electrólitos acuosos [31].
- Buena para el uso en aplicaciones "stand by", por ejemplo, como alimentación de sistemas de respaldo.
- Estado de carga (SOC) es fácil de interpretar e indicar.

Capítulo 4. Baterías

- Buena retención de energía al realizar cargas intermitentes.
- Hay modelos en el mercado "libres de mantenimiento".
- Posee muchos componentes reciclables.

Principales desventajas de las baterías de plomo ácido

- Ciclo de vida relativamente bajo (entre 50 500 ciclos usualmente). Para aplicaciones especiales y con un muy buen uso, pueden llegar a 2000 ciclos.
- Densidad de energía limitada. Típicamente de 30 $\frac{Wh}{kg}$ a 40 $\frac{Wh}{kg}$.
- Almacenar las baterías descargadas por largos períodos puede llevar a polarizar irreversiblemente los electrodos (sulfatación).
- Es difícil elaborarlas en capacidades muy pequeñas (es más fácil, por ejemplo, elaborar celdas tipo botón de Niquel-Cadmio para capacidades menores que 500 mAh).
- Evolución del Estilbeno y de la Arsina en diseños con Antimonio y Arsénico contenidos en las mismas pueden ser un peligro para la salud.
- El Hidrógeno en algunos diseños puede generar peligro de explosión e incendio. Es por esto que en algunas aplicaciones se instalan métodos de extinción de incendios con el conjunto de baterías.
- Se pueden tener fugas térmicas en baterías mal diseñadas. Esto puede corroer rápidamente las baterías.

4.3.2. Baterías de Níquel Cadmio

La batería de níquel-cadmio es mecánicamente robusta y de larga vida. Además, tiene excelentes características a baja temperatura y puede ser herméticamente sellada. El costo, sin embargo, es más alto en comparación con cualquier batería de plomo-ácido, o de níquel-zinc y en comparación, su capacidad de entregar energía en términos de Wh por kilogramo también es más pobre que para el níquel-zinc. Para muchas de las aplicaciones cotidianas, la elección sigue siendo entre los sistemas de plomo-ácido y níquel-cadmio. Cada uno de estos tipos de batería tiene sus ventajas y la elección entre el níquel-cadmio y las baterías de plomo-ácido dependen mucho de la aplicación particular y en las características de rendimiento requeridas. Además de estos dos tipos de batería, existen varios otros que, debido a su mayor costo, no se utilizan tan extensivamente, pero son de gran interés para campos particulares [33].

Las celdas de las baterías níquel-cadmio pueden ser divididas en dos grupos principales: celdas que tienen placas gruesas, en el que el material activo se comprime finamente en láminas de metal perforadas en forma de tubos o paquetes, y celdas con placas sinterizadas finas en las que el material activo se deposita

4.3. Clasificación de baterías según su química

en soportes de metal porosos. Este último tipo tiene una resistencia interna muy baja y una alta capacidad de carga que se traduce en una mejora en la relación potencia-volumen y potencia-peso. Hay baterías de tipo abierto o semiabierto. En estas celdas, el gas de electrólisis se escapa a través de una ventilación (por lo que se requiere el llenado periódico con agua para que se reemplace el electrolito). Hay también baterías completamente selladas que están diseñados de tal manera que no se produzca la evolución del gas y, en consecuencia, no se requiere la recarga del electrolito con agua. En general, los tipos de batería abierta o semiabierta están en el mayor rango de capacidad, siendo utilizadas para aplicaciones tales como tracción y grandes instalaciones eléctricas de emergencia. Las baterías selladas de Níquel - Cadmio están generalmente en el rango de capacidad inferior (hasta aproximadamente 30 Ah) [33]. Este tipo encuentra amplia aplicación en la electrónica, pequeños electrodomésticos, productos domésticos, equipos de defensa y mercados de investigación espacial.

4.3.3. Baterías con electrodo de hierro

Los electrodos de hierro se han utilizado como ánodos en los sistemas de baterías recargables desde la introducción de la batería recargable de níquel-hierro por Junger en Europa y Edison en los Estados Unidos. Hasta el día de hoy, las baterías de este tipo se producen de manera similar. A la construcción original se le han desarrollado nuevas construcciones que mejoran el rendimiento a altas corrientes y tienen menores costos de fabricación. Hoy la batería de níquel-hierro es el sistema recargable más común que utiliza electrodos de hierro. Baterías de hierroplata han sido probadas en aplicaciones electrónicas especiales, y las baterías de hierro / aire se han mostrado prometedoras para aplicaciones de potencia. Tiene una estructura física muy resistente y puede soportar gran esfuerzo eléctrico, sobrecargas tanto en carga como en descarga, cortocircuitos y tolera largos períodos de tiempo en inactividad a muy baja carga. Este tipo de baterías es utilizada cuando se requiere una larga vida útil, con descargas a altas corrientes y en repetidas descargas profundas (como por ejemplo en aplicaciones de tracción) y como fuente de alimentación de reserva con una vida útil de 10 a 20 años. Sus limitaciones son: la baja densidad de potencia, rendimiento comprometido a baja temperatura, bajo nivel de retención de carga y la evolución de los gases en la misma en los períodos de inactividad. El costo de la batería de níquel-hierro, para la mayoría de sus aplicaciones, se encuentra en el umbral entre las más baratas de Plomo-ácido y las más caras de Níquel-Cadmio [31].

4.3.4. Baterías de Hidruro de Níquel-Metal

Las baterías de Hidruro de Níquel-Metal (NiMH) son muy utilizadas en pequeñas aplicaciones de batería portátil. Las fuerzas impulsoras para el rápido crecimiento de NiMH fueron las ventajas ambientales y energéticas sobre el Níquel-Cadmio y el crecimiento explosivo de los dispositivos electrónicos portátiles tales como equipos de comunicación y computadoras portátiles. Gracias a sus ventajas

Capítulo 4. Baterías

técnicas sobre sus rivales (sistemas recargables), este sistema fue desarrollado también para baterías de grandes capacidades, incluyendo aplicaciones industriales y de vehículos eléctricos.

Las baterías de Hidruro de Níquel-Metal fueron consideradas ([31] edición 2001) la tecnología dominante para aplicaciones de vehículos eléctricos e híbridos, por tener el mejor comportamiento para satisfacer los requerimientos impuestos. Adicionalmente a los objetivos esenciales de comportamiento en energía, potencia, ciclo de vida y temperatura de operación, las características desplegadas a continuación hicieron de las baterías de Hidruro de Níquel-Metal una opción muy interesante. [31]

- Capacidades flexibles de celda, desde 0.3 Ah a 250 Ah.
- Operación segura a altos niveles de tensión (hasta 320 V).
- Muy buena densidad volumétrica de energía.
- Facilidad para el armado de cadenas serie / paralelo.
- Disponibilidad de diferentes formas de celda, como cilíndricas o prismáticas.
- Seguridad para la carga y descarga, incluyendo tolerancia a sobrecargas (y sobre-descargas).
- Muy buen comportamiento térmico
- Capacidad de utilizar frenado regenerativo (aplicaciones de VE)
- Circuitos de carga y control simples y baratos.
- Contiene materiales reciclables y no es nociva para el ambiente.

4.3.5. Baterías para Vehículos Eléctricos

Una batería para VE debe presentar ciertas características, como proporcionar la máxima potencia y energía posibles, poseer elevada densidad de potencia y energía, ocupar el mínimo tamaño y ser ligera. En la tabla 4.1 puede observarse una comparación entre los tipos de batería presentes en el mercado, una breve descripción de sus particularidades más relevantes a la hora de analizar su adaptabilidad para alimentar un vehículo eléctrico y un comentario sobre el nivel de adecuación de la misma para la aplicación en vehículos eléctricos.

4.4. Baterías de Litio

Tipo de batería	Particularidad	Adecuación	
Plomo-ácido	Pesada, recarga lenta, tóxico	Ninguna	
NiCd	Cara, efecto memoria	Muy baja	
NiFe	Baja potencia, eficiencia reducida	Ninguna	
NiMH	Alto mantenimiento, deterioro,	Baja	
	efecto memoria	Daja	
Li-ion	Muy caras, sin efecto memoria,	Muy buena	
	bajo mantenimiento, alta eficiencia y energía		
LiFePO	Alto coste, mayor potencia,	Muy buena	
	más duración, menor densidad de energía		
LiPo	Mucha energía y potencia,	Reducida	
	coste muy elevado, baja duración	Ittuttud	
ZEBRA	Baja potencia, mucho espacio,	Media-baja	
	muy duraderas, respuesta lenta		
Al-aire	Problemas de recarga, poco fiable,	Muy baja	
	altísima capacidad y energía		
Zn-aire	Fiables, mucha energía,	Muv alta (futuro)	
	coste moderado, escaso desarrollo		

Tabla 4.1: Tipos de baterías, particularidades y nivel de adaptación para Vehículos Eléctricos [34].

De las baterías que se encuentran en el mercado, las de ion Litio son las que mejor se adaptan a los requerimientos de los vehículos eléctricos en la actualidad. Sus características se verán en la sección 4.4 a continuación.

4.4. Baterías de Litio

Las baterías de litio resultan ser un sistema de almacenamiento muy conveniente por su bajo peso, elevado voltaje por celda, buena conductividad eléctrica y alta eficiencia electroquímica. Gracias a su desarrollo se tiene un comportamiento muy bueno y en muchos aspectos mejores que cualquiera de sus competidoras directas (ver tabla 4.1).

4.4.1. Consideraciones de funcionamiento

En cuanto a su funcionamiento y estructura están formadas por un cátodo (electrodo positivo, el cual está constituido por un óxido de litio metálico), un ánodo (electrodo negativo, generalmente de carbono o grafito) y un electrolito como conductor iónico (hecho de sal de litio en un solvente orgánico). El cátodo se encuentra recubierto por aluminio que funciona como colector de corriente, por su parte el ánodo está recubierto por cobre.

Capítulo 4. Baterías



Figura 4.4: Composición de batería de litio

Durante una descarga, el ánodo sufre una oxidación (o pérdida de electrones), y el cátodo ve una reducción (o ganancia de electrones). En el caso de una carga se invierte el movimiento antes mencionado.

La clave de la batería de litio para tener una buena energía específica, es el alto voltaje de la celda (aprox. 3,6 V). Las mejoras en los materiales activos y los electrolitos tienen el potencial de aumentar aún más la densidad de energía. Las características de carga son buenas y la curva de descarga plana del voltaje en función del SoC (pendiente casi nula) ofrece una utilización efectiva de la energía almacenada en un espectro de voltaje deseable y plano.

Las baterías de Li-ion son de bajo mantenimiento, lo cual es una gran ventaja. Otra característica importante es que no tienen efecto memoria y no necesitan ser cicladas totalmente (realizar descargas completas) para mantenerla en buena forma. También es importante su cualidad de tener baja tasa de auto-descarga.

Uno de sus principales inconvenientes, se encuentra en que son necesarios circuitos de control y protección para evitar sobrecargas, las cuales reducen la capacidad y eficiencia en gran medida. También como contrapartida se tiene que en caso de ser cargadas y almacenadas a un alto voltaje se degradan a altas temperaturas. [35]

4.4.2. Características según su diseño

Los diseños de las celdas varían según sus aplicaciones. Las formas más comúnmente utilizadas son: cilíndrica, prismática y pouch (conocida así por su término en inglés, tipo "bolsa"). Los componentes utilizados en los distintos diseños son los mismos y el funcionamiento es el mismo, sólo varía su disposición, lo cual lleva a

Cilindrica Prismática Pouch Separadores Cátodr Separadores Ánodo Pouch n pilas de Separador ánodo-separador-cátodo Cátodo Separado Ánodo Pouch Envolvente Ánodo Envolvente Cátodo

que tengan distintas características.

Figura 4.5: Formas constructivas de baterías de Litio

Las principales ventajas en cuanto a las formas son las siguientes:

Cilíndrica

La celda cilíndrica tiene una alta energía específica, buena estabilidad mecánica y se presta para fabricación automatizada, lo que hace que sean de bajo costo. Poseen buen ciclado y buena vida útil. [35] Constructivamente presenta una envolvente sellada que es capaz de soportar altas presiones internas. Posee un único enrollamiento cilíndrico de: electrodo positivo, separador, electrodo negativo y separador [36]. La batería más conocida de este estilo es la 18650 (nombrada así por sus dimensiones: 18 mm de diámetro y 65 mm de alto) utilizada en las aplicaciones de Tesla.

Prismática

Las celdas prismáticas están recubiertas en aluminio o acero para mayor estabilidad. Su diseño puede ser laminado o apilado, en ambos casos, la celda es eficiente en el espacio (admite geometrías más delgadas y personalizadas) pero puede ser más costosa de fabricar que la celda cilíndrica [36].

Pouch

La celda pouch o tipo "bolsa" utiliza un diseño laminado en una bolsa. Tienen la ventaja de ser livianas, baratas y se puede hacer un uso más eficiente del espacio disponible. Como contrapartida la humedad y las altas temperaturas pueden acortar su vida útil. Mientras que las celdas cilíndricas y prismáticas utilizan costosos revestimientos metálicos, en la celda tipo Pouch se utilizan varias capas termosellables. Los contactos eléctricos en estas celdas consisten en lengüetas de lámina conductora que se sueldan al electrodo y se sellan al material de la bolsa [36].

4.4.3. Características según su composición química

Las baterías de iones de litio pueden tener muchas variaciones en su composición química, pero todas tienen una cosa en común: el ion de litio en el electrolito.

Capítulo 4. Baterías



Figura 4.6: Celdas prismática, cilíndrica y tipo "pouch".

Aunque parecen similares a primera vista, estas baterías varían en rendimiento y características dependiendo de la elección de los materiales activos (generalmente del cátodo, ya que el ánodo es usualmente de grafito), lo cual les da atributos únicos. A continuación se detallan los materiales más utilizados.

LCO - Óxido de Litio Cobalto

Este material se produce industrialmente desde 1991, su fórmula química es $LiCoO_2$. Su alta energía específica hace de litio cobalto la opción popular para teléfonos móviles y computadoras portátiles. La batería consta de un cátodo de óxido de litio cobalto y un ánodo de carbono de grafito. El cátodo tiene una estructura en capas. Los inconvenientes del litio cobalto son una vida útil relativamente corta, baja estabilidad térmica y capacidades de carga limitadas (potencia específica).

Estas baterías no deben cargarse ni descargarse a una corriente superior a su Crate nominal, por lo tanto forzar una carga rápida o aplicar una carga superior a 1C causa sobrecalentamiento y estrés indebido. Para una carga rápida óptima generalmente se recomiendan Crate de 0,8C [37].

El litio cobalto no termina favorecido al compararlo con las baterías de litio manganeso, pero especialmente con las de NMC y el NCA (como se verá más adelante) debido al alto costo del cobalto y al mejor rendimiento del cobalto al mezclarse con otros materiales activos del cátodo. En la tabla 4.2 se resumen sus principales características.
LMO - Óxido de Litio Manganeso

Este material se utiliza desde 1996, su composición química es $LiMn_2O_4$. El cátodo tiene una estructura de espinela tridimensional (la espinela es un tipo de óxido complejo cuya estructura se puede describir como un paquete cúbico compacto de oxígenos con los iones Li ocupando 1/8 de las posiciones tetraédricas y los iones Mn en 1/2 de las posiciones octaédricas) que mejora el flujo de iones en el electrodo, lo que resulta en una menor resistencia interna y un mejor manejo de la corriente. Otra ventaja de la espinela es su alta estabilidad térmica y mayor seguridad.

Al tener baja resistencia interna, permite realizar cargas rápidas y altas corrientes durante la descarga. Como contrapartida tiene menor capacidad y vida útil más limitada [37].

LFP - Litio Hierro Fosfato

Este material catódico es muy utilizado para movilidad eléctrica. Su composición química es $LiFePO_4$. Los beneficios principales son un altos valores de Cratey una larga vida útil. Además poseen una buena estabilidad térmica, mayor seguridad y tolerancia en caso de abuso.

Al no tener cobalto se tienen menores costos de producción.

El litio fosfato es más tolerante a las condiciones de carga completa y se estresa menos si se mantiene a alto voltaje durante un tiempo prolongado (comparado con otros sistemas de iones de litio). Como disyuntiva, su menor voltaje nominal (de 3.2 V en la mayoría de los casos) por celda reduce la energía específica [37].

BYD es uno de los principales fabricantes de baterías LFP, las cuales son utilizadas para su propia producción de vehículos eléctricos.

NCA - Óxido de Litio Níquel Cobalto Aluminio

Esta solución para baterías se utiliza aproximadamente desde 1999. Su composición química es $LiNiCoAl_2$. Su cátodo está formado por una combinación de: Litio, Níquel, Cobalto y Aluminio. Posee alta energía específica, potencia específica relativamente buena y una larga vida útil. Características menos favorecedoras son la seguridad y el costo. Las baterías de NCA provienen de un desarrollo del óxido de níquel y litio al cual se le agrega aluminio para darle una mayor estabilidad [37].

En la actualidad uno de los principales fabricantes de este tipo de baterías es Panasonic, el cual las desarrolla, entre otros, para vehículos Tesla.

Capítulo 4. Baterías



(a) Paquete de baterías Tesla Model S (b) Celda Panasonic 18650 para Tesla

Figura 4.7: Baterías NCA utilizadas en Tesla

NMC - Óxido de Litio Níquel Manganeso Cobalto

Uno de los sistemas de iones de litio más utilizados para sistemas de movilidad eléctrica es una combinación de cátodo de níquel-manganeso-cobalto (NMC). Su fórmula química es $LiNiMnCo_2$.

La clave de la combinación de NMC es la siguiente: el níquel otorga alta energía específica pero pobre estabilidad; el manganeso tiene la ventaja de formar una estructura de espinela para lograr una baja resistencia interna, pero a cambio ofrece una energía específica baja. Los metales complementan sus virtudes. La combinación ofrece una mezcla que reduce el costo de la materia prima debido al contenido reducido de cobalto.

Los fabricantes de baterías están migrando sus tecnologías de los sistemas de cobalto hacia cátodos de níquel debido al alto costo del cobalto. Los sistemas basados en níquel tienen una mayor densidad de energía, menor costo y vida útil más larga que las celdas basadas en cobalto, pero tienen un voltaje ligeramente menor [37].

Uno de los principales fabricantes es LG Chem, el cual entre otros trabaja para Renault, Chevrolet y Volkswagen.

LTO - Litio titanato

Las baterías de litio titanio $(Li_4Ti_5O_{12})$ son un desarrollo relativamente reciente. Se trata de otra opción en cuanto a los materiales del ánodo. El titanato de litio reemplaza al ánodo grafito típicamente utilizado. El cátodo puede ser óxido de manganeso de litio o NMC.

El titanato de litio tiene un voltaje de celda nominal de 2.40 V, se puede cargar rápidamente y ofrece una alta corriente de descarga de 10C. Además tiene mayor capacidad de ciclado, es seguro y tiene excelentes características de descarga a bajas temperaturas.

Como contrapartida, es una batería costosa y además su energía específica es baja (apenas 65 Wh / kg aproximadamente) [37].

La descripción anterior reúne los seis tipos de químicas más utilizadas en las baterías de litio. A modo de resumen, de forma de realizar una comparación cualitativa se indican en la figura 4.8 las principales características a destacar.



Figura 4.8: Comparativa de baterías de litio según su composición [37].

A continuación en la tabla 4.2 se presentan las características y valores más relevantes de los distintos tipos de químicas de baterías de litio.

de ica	LCO	LMO	LFP	NCA	NMC	LTO
ción	Oxido de Litio Cobalto	Oxido de Litio Manganeso	Litio Hierro Fosfato	Oxido de Litio Níquel Cobalto Aluminio	Oxido de Litio Níquel Manganeso	Litio Titanato
	3.6 V	3.7 V - 3.8 V	3.2 V - 3.3 V	3.6 V	3.6 V - 3.7 V	2.4 V
е _	3.0 - 4.2 V	3.0 - 4.2 V	2.5 - 3.65 V	3.0 - 4.2 V	3.0 - 4.2 V	1.8 - 2.85 V
_	$150-200\mathrm{Wh/kg}$	$100-150 \mathrm{Wh/kg}$	$90-120 \mathrm{Wh/kg}$	200-260Wh/kg	$150-220 \mathrm{Wh/kg}$	$70-80 \mathrm{Wh/kg}$
	0.7–1C típico. No cargar a mas de 1C	0.7–1C típico. Carga máx.3C	1C típico.	0.7C típico.	1C típico. 2C posible.	1C típico. 5C máx.
	1C típico. Voltaje de corte 2.5V	1C. 10C es posible. Voltaje de corte 2.5V	1C típico. Voltaje de corte 2.5V	1C típico. Voltaje de corte 3.0V	1C -2C típico. Voltaje de corte 2.5V	1C. 10C posible Voltaje de corte 1.8V
	500 - 1000	300-700	1000-2000	500	1000-2000	3000-7000
rios	Alta energía, potencia limitada. El Cobalto la hace costosa. Se produce desde 1991.	Buena potencia, poca capacidad. Se utilizaron en las primeras aplicaciones de Renault y Nissan. Producidas desde 1996.	Buen voltaje de des- carga plano. Alta potencia, baja capacidad. De las más seguras. Utilizada autodescarga. Utilizada en aplicaciones de BYD. Se procude desde 1996.	Alta capacidad. Potencia moderada. Utilizada en vehículos Tesla. Producida desde 1999.	Alta capacidad y alta potencia. Es la más utilizada en las aplicaciones recientes de VE. Producida desde 2008.	Alta vida útil. Muy segura pero baja capacidad. Es costosa.

química.
según su
e litio
baterías d
le las l
características c
Principales
Tabla 4.2:

Capítulo 4. Baterías

Cabe aclarar que en la tabla 4.2 los valores de ciclos de vida son calculados estimativamente ya que los ciclos de vida están directamente relacionados al DoD y la temperatura de las baterías (tal como se explicó en la sección 4.2).

4.4.4. Factores que afectan el funcionamiento

Hay varios factores que afectan el funcionamiento de las baterías. Esos factores tienen repercusión directa en la degradación de la batería y por lo tanto su correcta comprensión es relevante para extender su vida útil.

4.4.4.1. SOC

En los vehículos eléctricos, con el fin de prolongar la vida útil de las baterías no se utiliza la capacidad total de las baterías (la cual es normalmente la indicada por los fabricantes). Lo que ocurre es que se deja un margen de seguridad para poder operar correctamente. Por lo tanto el controlador de las baterías, permite utilizar la misma entre un $10\sim20~\%$ y un $80\sim90~\%$ de la capacidad total o "bruta", esa es la energía "utilizable" [38]. O sea que cuando en el vehículo se indica un 0~% del SOC eso no es el 0~% de las celdas de la batería, sino que corresponde a un $10\sim20~\%$ de la capacidad bruta o absoluta. En la figura 4.9 se puede ver de forma gráfica lo anterior.



Figura 4.9: Energía utilizable y absoluta en las baterías de litio

4.4.4.2. Temperatura

Influye directamente en las características de los componentes químicos y eso afecta las reacciones que determinan las distintas características de las baterías. Tanto las altas como las bajas temperaturas alteran a las baterías de litio por lo que el rango óptimo de temperatura de operación en baterías de litio se encuentra entre $15-35^{\circ}$ C [39].

Al disminuir la temperatura, las reacciones electroquímicas se enlentecen (aumenta su resistencia interna), reduciéndose por lo tanto la corriente máxima, esto

Capítulo 4. Baterías

afecta a la aceleración del vehículo, a su capacidad y por lo tanto a la autonomía [40].

Por otro lado un calor excesivo también afecta a la batería, ya que acelera las reacciones electroquímicas. La capacidad en amperios-hora y la energía también suelen aumentar. Sin embargo, su actividad química puede ser lo suficientemente rápida durante la descarga (lo cual puede provocar autodescargas) y causar una pérdida neta de capacidad.



Figura 4.10: Resistencia interna de una batería de litio en función del SOC al variar la temperatura.

En la figura 4.10 se puede ver como varía la resistencia interna con la temperatura. La reducción de la temperatura de descarga dará como resultado una reducción de la capacidad, así como un aumento en la pendiente de la curva de descarga. A temperaturas más altas, la resistencia interna disminuye y la tensión de descarga aumenta [31].

4.4.4.3. Tensión y Corriente por la batería

La corriente de descarga por la batería afecta tanto el funcionamiento de la misma, como sus prestaciones. Por ejemplo, en el caso que se aumente la corriente de descarga (C_{rate}), entonces el voltaje en la batería varía ya que aumenta la caída de tensión R.I (producto de la corriente de descarga y la resistencia interna) [31], esto lleva a que se tenga un voltaje de celda menor. También ocurre que con altas corrientes de descarga no se obtiene el valor teórico máximo de su capacidad. Lo anteriormente expuesto se puede ver gráficamente en la figura 4.11.



Figura 4.11: Voltaje de una celda de litio en función de la capacidad a distintos C_{rate}

A medida que aumenta la corriente corriente (mayor C_{rate}), el voltaje de descarga disminuye, la pendiente de la curva de descarga se hace más pronunciada y se reduce la vida útil, así como la capacidad que se le puede extraer menos amperios-hora a la batería [31].

Capítulo 4. Baterías

4.4.4.4. SOH

El estado de salud es uno de los puntos más importantes de la batería (en el punto 7.4 se estudiará en profundidad un algoritmo utilizado para calcular el SOH en baterías NMC), determina el envejecimiento que se ha producido en la batería y que no es posible revertir. El grado de envejecimiento es directamente proporcional al número de cargas/descargas (número de ciclos) que haya sufrido la batería [38], además de la forma en la que éstas se produzcan. Cuanto más intensos sean los procesos de descarga/carga mayor será el envejecimiento. Otras condicionantes para el estado de salud a tener en cuenta son el tiempo y temperatura de funcionamiento de la batería [41].



Figura 4.12: Número de ciclos en función del DoD para distintos tipos de química. [42]

Los ciclos de funcionamiento que sea capaz de cumplir la batería dependerán del tipo de descarga al que sea sometida. En concreto el DOD y el SOH poseen una relación logarítmica (tal como se muestra en la figura 4.12), los ciclos que será capaz de cumplir la batería disminuirán exponencialmente cuanto mayor sea la profundidad de descarga.

4.4.5. Carga en baterías de Litio

Los cargadores y la forma en que se cargan los vehículos eléctricos tienen gran relevancia en la vida útil de las baterías. Los cargadores deben ser muy precisos ya que las baterías de litio no pueden aceptar sobrecargas. En la mayoría de las aplicaciones de Litio Ion, el voltaje máximo de carga es 4,2 V. Si bien el hecho de aumentar el voltaje máximo incrementa la capacidad máxima de la batería, se tiene un gran estrés en la batería lo cual compromete su vida útil y su seguridad.

A continuación se describe la lógica durante el proceso de carga, el cual se divide en cuatro "etapas". En algunas bibliografías el orden de las etapas varía (entre las etapas 3 y 4), a modo de resumen se describen las mismas a continuación.



Figura 4.13: Etapas durante el proceso de carga.

- Etapa 1: Corriente constante En esta primera etapa se suministra corriente constante máxima a la batería, de manera que la tensión aumenta rápidamente hasta llegar al primer límite de voltaje. Una vez alcanzado este límite de voltaje la batería está cargada un 80~90 %, a partir de este punto se pasa a la etapa 2 [43].
- Etapa 2: Tensión constante En esta etapa se trabaja a tensión constante (con el valor de tensión máximo que se trae de la etapa anterior), mientras que la corriente de carga disminuye lentamente, la capacidad de la batería aumenta hasta llegar al 100 % de carga. La finalidad de esta etapa es recuperar el electrolito, que puede haberse visto alterado en procesos de descarga profunda.
- Etapa 3: Flotación Se ingresa a la etapa 3 cuando la batería esta totalmente cargada, generalmente en este momento la corriente por la batería es un 3% de la nominal. En la etapa de flotación se trabaja a potenciales bajos y constantes. Si pretende almacenarse la batería, el voltaje de la batería comienza a disminuir. Esto lo que hace es mitigar el estrés generado por la alta tensión a la que acaba de cargarse [44]. En los casos en que los vehículos deban dejarse en el cargador para la disponibilidad operacional, algunos cargadores aplican una breve carga adicional para compensar la pequeña descarga automática que la batería y su circuito de protección consumen.
- Etapa 4: Ecualización En esta etapa, se aplica una corriente baja mientras se mantiene una tensión alta. Tiene como fin el ascenso del gas dentro del electrolito haciendo que la disolución llegue a ser homogénea. Tras esta etapa conseguimos que todas las celdas tengan el mismo voltaje [43].

La presente temática acerca de la carga del vehículo también se describe más adelante en el punto 8.6.2.2 que trata acerca del modelado y la interacción desde la red hacia el vehículo (G2V).

Capítulo 4. Baterías

4.4.6. Desarrollos a futuro

Los principales desarrollos a futuro, en cuanto a baterías destinadas a movilidad eléctrica son las siguientes.

Baterías de Litio-Azufre

Esta tecnología se basa en un nuevo cátodo con partículas de azufre puro, el cual en comparación con las típicas aplicaciones de níquel, cobalto y manganeso es más ligero y barato.

Las baterías de litio-azufre para poder ser un sustituto a las de litio convencionales deberían superar los 400 Wh/kg. Como principal inconveniente se tiene que se atenúan sus características luego de varios ciclados, esto ocurre por la expansión del azufre durante el proceso de carga y descarga [45].

Baterías de Metal-Aire

En estas baterías uno de sus reactivos es el oxígeno del aire, que es muy abundante, ligero y sin coste. Por estas razones la energía específica de una batería Metal-aire puede ser 7-8 veces mayor que la de una batería Litio-ión.

Las baterías de metal-aire se basan en la utilización de un cátodo externo, concretamente el propio oxígeno del aire, junto a un ánodo de metal puro en un electrolito líquido. Como ánodos metálicos generalmente se utilizan el Zinc o el Aluminio.

En este tipo de baterías la conversión electroquímica se produce en la reacción del oxígeno con el metal, al entrar en contacto.

La principal ventaja es que se consigue la máxima densidad energética para la pila, con un peso notablemente inferior a las alternativas de litio que ya están en uso, y con una autonomía muy superior gracias esta densidad. Como principal desventaja se tiene que durante la recarga el ánodo metálico se deteriora, por lo que actualmente no son la mejor opción para vehículos eléctricos recargables [46].

Baterías de estado sólido

En este tipo de baterías la principal diferencia radica en el electrolito, el cual está formado por un material sólido.

El electrolito sólido permite utilizar un ánodo de metal alcalino lo que incrementa la densidad de carga de la batería [47]. Además son más seguras ya que carecen de líquidos inflamables, esto a su vez permite que se puedan utilizar a altas corrientes de carga/descarga. Actualmente se utilizan ánodos formados de metal litio, cuyo problema es que la mayoría de los electrolitos sólidos existentes tienen inestabilidad contra el metal litio, lo que provoca reacciones secundarias no deseadas. Estas reacciones secundarias provocan un aumento de la resistencia, lo que reduce considerablemente el rendimiento de la batería durante los ciclos repetidos [48].

Capítulo 5

Vehículos a estudiar

Luego de haber introducido conceptos básicos sobre los vehículos eléctricos en general y sus componentes, como conceptos teóricos sobre los diferentes tipos de baterías, se procederá ahora a presentar los vehículos que se simularán y analizarán en los capítulos 11 y 12.

En el presente capítulo se describen las principales características de los vehículos eléctricos a modelar, tales como su potencia, energía, torque máximo, autonomía con ciclos de conducción estandarizados (se detallan en la sección 6), tipo de batería que utilizan, garantía de la batería y costo del vehículo.

Se buscarán implementar vehículos que sean conocidos mundialmente, con posibilidades reales de arribar al mercado Uruguayo (en caso que no hayan arribado aún).

En las siguientes secciones se procede a presentar los mismos.

5.1. Renault Kangoo

5.1.1. Modelo 2011 - 22 kWh

El modelo utilizado es el Renault Kangoo ZE Maxi. Se comenzó a producir en el 2011. Es un vehículo utilitario, con un motor de 44 kW, paquete de baterías litio (LMO) de 22 kWh (disponibles para utilizar). Su autonomía según ciclo NEDC (New European Driving Cycle, ver 6) es de 170 km y alcanza una velocidad máxima de 130 km/h [49].

Capítulo 5. Vehículos a estudiar



Figura 5.1: Renault Kangoo ZE Maxi

Este vehículo cuenta además con el modo "ECO" el cual se encarga de reducir la potencia disminuyendo también la velocidad punta. Esto es útil en recorridos urbanos, no repercute demasiado en la velocidad final y así se puede llegar a ahorrar hasta un 10 % de batería. En cuanto a la carga, se puede utilizar un cargador de pared, (el tiempo de recarga ronda entre de 6 a 8 horas) el cual carga a una potencia de 3.6 kW. Si se utiliza un cargador portátil la recarga puede durar más, ya que la recarga se producirá a una corriente no superior a 10 A (toma Schuko) o 16 A (toma CEE) [50]. En cuanto a la garantía, el fabricante ofrece 5 años o 150.000 km.

Este modelo es el utilizado en las pruebas reales que se realizaron (ver capítulo 10), por lo tanto es principalmente empleado al momento de comparar distintos ciclos de conducción.

De aquí en más, la documentación se referirá a este modelo en las futuras tablas e imágenes como "Renault Kangoo".

5.1.2. Modelo 2017 - 33kWh

En 2017 se lanzó un modelo más reciente (ZE 33), el cual cuenta con un paquete de baterías de 33 kWh (de las cuales se consideran utilizables 31 kWh). El motor sigue siendo de 44 kW y torque máximo 225 Nm. El cambio principal en este nuevo modelo radica en el cambio de la tecnología de las baterías (la nueva versión utiliza NMC) y una mejora en la eficiencia del motor [51]. Esto hace que su autonomía bajo el ciclo NEDC sea de 270 km. Este modelo permite una potencia de carga superior en AC de 7,4 kW. El precio aproximado para el modelo ZE 33 ronda los USD 38.990 [52].

Este vehículo es uno de los últimos agregados al análisis en el presente proyecto, por lo que será principalmente utilizado a partir del capítulo 12.3 en adelante.

Vale la pena aclarar que agregado ya que el algoritmo implementado para el estado de salud (ver capítulo 7.4) está basado en baterías del tipo NMC, por lo que si se desea estudiar la afectación de las baterías en los Renault Kangoo era necesario contar con algún modelo que utilice este tipo de química.

De aquí en más, la documentación se referirá a este modelo en las futuras tablas e imágenes como "Renault Kangoo 33".

5.2. Nissan Leaf

La primera generación de Nissan LEAF comenzó a venderse en Japón en diciembre de 2010. Su nombre proviene de las siglas en inglés "Leading, Environmentally friendly, Affordable, Family car" [53]. En la primera generación de Leaf, la potencia del motor era de 109 CV (80 kW), su batería tenía una energía de 24 kWh (de los cuales 22 kWh son disponibles para utilizar) y su autonomía homologada en ciclo NEDC era de 175 km. Luego surgieron varias actualizaciones, por ejemplo en el modelo 2013 llamado "Visia" (modelo utilizado para las simulaciones) se llega a tener una autonomía de 199 km con el ciclo NEDC y velocidad máxima 144 km/h. La diferencia con el modelo 2010 se encuentra en una mejora de los materiales y una disminución del peso del vehículo.



Figura 5.2: Nissan Leaf

El modelo más reciente es el 2018, que cuenta con una batería de 40 kWh (baterías de NMC, del fabricante AESC) [54], un motor de potencia 150 CV (110 kW), lo que permite una autonomía de 270 km en ciclo WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure, ver 6) y 398 km en ciclo NEDC. La batería tiene una garantía de 8 años o 160.000 km. El precio de la versión básica del modelo 2018 es de \in 31.260 (precio para España) [53].

5.3. Renault Zoe

El Renault Zoe es un hatchback de 5 puertas, su primera versión posee un paquete de baterías de 22 kWh que ofrece un rango de autonomía de 210 km en el ciclo NEDC. En 2016, Renault anunció la introducción de una nueva batería de 41 kWh (utilizables), aumentando el alcance a 400 km (NEDC) [55].





Figura 5.3: Renault Zoe

El modelo utilizado en las simulaciones corresponde a uno de los más recientes (modelo R110) que posee un motor de 80 kW, torque máximo 225 Nm y las baterías mencionadas anteriormente de 41 kWh (tipo NMC, fabircadas por LG Chem). Posee una autonomía de 300 km bajo el ciclo WLTP (400 km NEDC) [55].

En cuanto a la carga, el modelo R110 permite como máximo una carga trifásica (32 A) de 22 kW. El cargador incluido es el Tipo 2 [56]. El precio en Europa de esta versión es de aproximadamente $\in 35.090$ (depende de los distintos equipamientos que tenga).

5.4. BYD E6

Este vehículo fabricado por la empresa China BYD Auto comenzó a producirse en 2010.

Tiene un motor eléctrico que le proporciona una potencia de 90 kW (122 CV). La velocidad máxima es de 140 km/h y la batería de litio (LFP) tiene una energía de 61 kWh (aproximadamente 57 kWh utilizables) [57]. La autonomía bajo el ciclo NEDC es de 300 km y puede cargarse con una conexión doméstica al 80 % en 15 minutos. Para completar la carga al 100 % le toma 6 horas. Con un cargador wallbox (380 V, trifásica, 63 A) le toma 2 horas cargarse completamente [58].



Figura 5.4: BYD E6

El vehículo tiene una garantía es de 5 años o 500.000 km y además se garantiza que después de 4.000 ciclos de carga completa la batería mantendrá el 80% de la capacidad. El precio aproximado del BYD E6 para Uruguay es de USD 65.000 [52].

5.5. Volkswagen e-UP!

Volkswagen se lanzó en el año 2013 en el mercado de los vehículos eléctricos con dos modelos conocidos de combustión pero convertidos a eléctricos: el e-UP! y el e-Golf. En particular el e-UP! está pensado como un coche compacto y urbano. Posee una batería de 18,7 kWh (16 kWh utilizables), tiene un alcance de 160 km (NEDC) y 134 km (WLTP). Su motor eléctrico es capaz de entregar 60 kW (82 CV) y 210 Nm de par. Su precio comienza en ≤ 25.095 (precio en Alemania) [59].



Figura 5.5: Volkswagen e-UP!

Volkswagen ofrece para los e-UP una garantía de la batería de 8 años o 160.000 km (lo que suceda antes), además se asegura que las baterías alcanzan sin problemas 3.000 ciclos de carga completos. La opción de recarga más sencilla es cargar desde la red doméstica a 230 V (2,3 kW), lo cual recarga al 100 % en nueve horas. Como opción también se puede recargar a través de wallbox, lo cual permite cargar a 3,6 kW, una recarga completa en 6 horas [60]. Capítulo 5. Vehículos a estudiar

5.6. Tabla con características

A continuación se expone un resumen de las principales características de los vehículos anteriores. Por más datos sobre los vehículos utilizados remitirse a la tabla que se encuentra en el apéndice A.

Vehículo	Renault Kangoo	Nissan Leaf	Renault Zoe	BYD E6	Volkswagen e-UP!	Renault Kangoo 33
Potencia (kW)	44	80	80	90	61	44
Torque (Nm)	226	254	225	450	210	225
Voltaje batería (V)	360	360	345.6	307	374	345.6
Energía batería(kWh)	22	24	41	61	18.7	33
Química batería	LMO	LMO	NMC	LFP	NMC	NMC
Peso en vacío (kg)	1553	1474	1575	2380	1139	1553

Tabla 5.1: Principales características de los vehículos eléctricos utilizados en las simulaciones.

Capítulo 6 Ciclos de Conducción

Luego de haber definido los vehículos con los que se va a trabajar en el software a desarrollar, se procederá a introducir uno de los conceptos fundamentales para su uso; los ciclos de conducción.

Los ciclos de conducción serán una herramienta clave para evaluar los distintos perfiles de velocidad realizados en un trayecto, para determinar la autonomía de un coche eléctrico y para definir valores de rendimiento, entre algunas otras aplicaciones que se irán desarrollando a lo largo del capítulo.

En la presente sección se detallarán los dos ciclos de conducción internacionales más utilizados, que son el WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) y el NEDC (New European Driving Cycle), y además se procederá a realizar una introducción de un ciclo de conducción creado en Montevideo, el cuál se presentará en detalle en la sección 10.

6.1. Conceptos generales sobre ciclos

Una forma usual de medir el nivel de emisiones contaminantes de los vehículos de combustión ha sido mediante los ciclos de conducción estandarizados. Hoy día, aunque libres de emisiones contaminantes, los vehículos eléctricos aprovechan algunos de estos ciclos de conducción, y es a partir de los mismos que se determinan algunos de sus parámetros principales, como por ejemplo, su autonomía.

Los ciclos de conducción son datos ordenados de velocidad en función del tiempo que describen cierto recorrido. Existen multiplicidad de ciclos, que buscan representar recorridos urbanos, rurales, de autopista, largos, cortos, con y sin tráfico, o que incluso agrupen muchos de estos comportamientos.

Se han realizado ciclos de conducción representativos de distintas ciudades y países, intentando representar de la mejor manera posible el uso que se le daría a un vehículo en los mismos.

Los ciclos de conducción se utilizan en pruebas de laboratorio con vehículos.

Capítulo 6. Ciclos de Conducción

Como se mencionó anteriormente, tienen como principales objetivos la determinación de:

- Consumo de combustible (vehículos ICE e híbridos)
- Emisiones de CO2 (vehículos ICE e híbridos)
- Otras emisiones contaminantes (vehículos ICE e híbridos)
- Consumos de energías de propulsión alternativas (Por Ej. para vehículos híbridos)
- Rangos de autonomía de vehículos eléctricos

6.1.1. Ciclos de Conducción estandarizados

Ciclo NEDC

El New European Driving Cycle (NEDC) es un ciclo de conducción estandarizado europeo, utilizado durante muchos años para realizar las pruebas de laboratorio que midieran el nivel de emisiones de los vehículos a combustión interna.

En la figura 6.1 se observa el perfil de velocidad en función del tiempo que se aplica sobre el vehículo. Destacan dos zonas claramente diferenciables por la velocidad máxima. El primer tramo, que va hasta los 800 segundos, representa un recorrido urbano, con velocidades máximas de 50 km/h, en donde se tienen zonas donde hay que reducir la velocidad a cero, ya sea por atascos, semáforos, etc. La segunda parte, a partir de los 800 s, representa una conducción de carretera con una velocidad máxima de 120 km/h, que se supone de mayor exigencia.



Figura 6.1: Ciclo de Conducción NEDC

El ciclo dura 1180 segundos. En total se recorren 10,94 km a una velocidad media de 33,6 km/h.

La prueba se divide en dos partes. Los primeros 770 segundos corresponden a la prueba de consumo urbano, en la que se recorren 3,98 km a una velocidad media de 18,35 km/h.

A partir de los 800 s y hasta los 1180 s, corresponden a la prueba extra urbana, donde se recorren 6.96 km, a una velocidad media de 62.6 km/h.

Las principales críticas que ha recibido este Ciclo de Conducción es que no representa de forma real a un ciclo de conducción. En el ciclo NEDC hay muchas velocidades mantenidas en el tiempo y la aceleración es paulatina; no hay frenadas bruscas, cambios de aceleración, los cuales son situaciones reales al momento de conducir.

6.1.2. Ciclo WLTP

El ciclo WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) fue desarrollado con el objetivo de ser utilizado como un Ciclo de Conducción global (adaptable a diferentes regiones del mundo). Se definen cuatro etapas con diferentes velocidades promedio: "baja", "media", "alta" y "extra alta". Las etapas incluyen variedad de fases de conducción, con aceleraciones, frenados y lapsos de vehículo detenido. Se definen también tres sub-ciclos o clases que se aplican para probar los vehículos dependiendo la potencia del motor y su masa en vacío. En la figura 6.2 puede observarse el Ciclo WLTP Clase 3 completo y con sus etapas ("baja", "media", "alta" y "extra alta") diferenciadas.

En la tabla 6.1 pueden apreciarse las características principales de cada etapa.

Etapa	Duración (s)	Velocidad máxima (km/h)	Velocidad media (km/h)	Velocidad media con paradas (km/h)	Distancia (km)
Baja	589	56.5	25.7	18.9	3.1
Media	433	76.6	44.5	39.5	4.8
Alta	455	97.4	60.8	56.6	7.2
Extra alta	323	131.1	94.0	92.0	8.3

Tabla 6.1: Etapas del Ciclo WLTP

Clase	Tiempo total (s)	Velocidad máxima (km/h)	Velocidad media (km/h)	Distancia recorrida (km)
Clase 1	1022	64.4	28.5	8.1
Clase 2	1447	85.2	35.7	14.7
Clase 3	1800	131.3	46.5	23.3

Tabla 6.2: Clases del Ciclo WLTP

Como se mencionó anteriormente, hay tres clases definidas de Ciclos WLTP. Se define la Masa de Vacío (kg) como la masa del vehículo con los equipos fundamentales para su circulación. • Clase 1:

Considera las etapas "baja" y "media". Se aplica a vehículos que cumplen la relación: $\frac{Potencia(W)}{Masa\;de\;Vac\acute{i}o(kg)} \leq 22 \frac{W}{kg}.$

• Clase 2:

Considera las etapas "baja", "media" y "alta". Se aplica a vehículos que cumplen: $22 \frac{W}{kg} \leq \frac{Potencia(W)}{Masa\; de\; Vacio(kg)} \leq 34 \frac{W}{kg}$.

• Clase 3:

 $\label{eq:consideral} \begin{array}{l} \mbox{Considera las cuatro etapas. Se aplica a vehículos que cumplen:} \\ \frac{Potencia(W)}{Masa\; de\; Vacio(kg)} > 34 \frac{W}{kg}. \end{array}$

En la tabla 6.2 se muestran las características principales de cada clase. En líneas generales, tanto para los vehículos convencionales de ciudad, como para los vehículos utilitarios, aplica el Ciclo WLTP Clase 3.



Figura 6.2: Ciclo de Conducción WLTP Clase 3

Por último, el ciclo WLTP se introdujo en el mercado en el año 2017 y es obligatorio a partir del 1ero de Setiembre de 2018 para todos los vehículos eléctricos nuevos. Por lo cual, los vehículos cuyos modelos son anteriores a la fecha mencionada no están obligados a testear bajo el ciclo WLTP. Es por eso que en muchos casos no se tienen valores de autonomía en WLTP para vehículos anteriores al 2018.

6.2. Ciclo Montevideo

Hay una gran variedad de ciclos de conducción estudiados e implementados alrededor del mundo. Se han buscado representar las realidades de cada ciudad, los perfiles de los distintos conductores y la mejor estimación tanto de los consumos como de las emisiones.

Es posible, a través del uso de las herramientas adecuadas, registrar un ciclo de conducción personal, por ejemplo, de un recorrido que se realice en el día a día por una persona o perfil de usuario, de un recorrido estándar que realice una población en común,o de tramos de ciudad, autopista, ruta, avenida o de cualquier condición particular que brinde una ciudad o entorno.

Aprovechando un recorrido realizado en un vehículo eléctrico, se lograron relevar los perfiles de velocidad en función del tiempo y los valores de las pendientes durante el recorrido. De esta forma, queda determinado un Ciclo de Conducción, que si bien no tiene por qué ser representativo de la ciudad de Montevideo, es de gran utilidad para contrastar los valores de autonomía obtenidos para vehículos eléctricos con los ciclos de conducción internacionales como NEDC y WLTP, con un ciclo real realizado.

En el capítulo 10 se describe como se relevaron los datos y se muestran tanto los niveles de inclinación del terreno como el perfil de velocidades relevados.

Luego, en la sección 12.1, del Capítulo 12, se aprecian los resultados de la comparativa entre los ciclos elaborados y los internacionales utilizando la herramienta desarrollada en el presente trabajo.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 7

Consideraciones para el modelado

Como se ha mencionado en el resumen de este trabajo, uno de los objetivos principales del proyecto es la implementación de un software que permita realizar simulaciones de vehículos eléctricos. Esto posibilitará evaluar el desempeño, el uso y la gestión que se les puede dar a las baterías. Para la implementación del mencionado software será necesario considerar algunos modelados de los fenómenos físicos y químicos de los procesos involucrados en el vehículo eléctrico.

En el capítulo 8 se detallará cómo se implementan estos modelos descritos en el software utilizado para las simulaciones (Matlab-Simulink) y cómo dichos modelos afectan a la dinámica del vehículo.

Entre los modelos de mayor relevancia dentro del software, se encuentran las ecuaciones que describen el movimiento del vehículo. Será importante determinar el par que debe entregarse en el eje del motor para impulsar al coche ante las exigencias que determinen el conductor, el terreno y las propiedades del vehículo (por ejemplo, su masa). Es por esto, que en la sección 7.1 se encontrará el desarrollo de las ecuaciones que modelan el torque real en un vehículo eléctrico.

Por otra parte, dentro del presente capítulo, se destinarán las secciones 7.2 y 7.3 para detallar el modelado de dos componentes fundamentales del vehículo eléctrico como son el motor y la batería. Será importante evaluar las consideraciones que se toman para modelar estos componentes, así como también cuales serán las variables de entrada que se manejarán para la implementación del software (ver implementación en la sección 8.7.1).

Otro de los puntos a estudiar en el presente proyecto es la correcta gestión de la batería frente a distintos casos y posibilidades de uso. Para poder evaluar esto correctamente, se consideró interesante implementar un algoritmo que permitiese estimar la vida útil o el deterioro de la batería al realizar un determinado uso de la misma. En aras de conseguir este objetivo, se buscaron artículos científicos que pudieren servir al propósito, teniendo en cuenta que los datos de entrada del algoritmo fuesen los que se obtienen de las simulaciones.

En la sección 7.4 se analiza un artículo científico [38] que será posteriormente

Capítulo 7. Consideraciones para el modelado

implementado en el software. El mismo determina un ajuste para la capacidad máxima (en Ah) que es capaz de almacenar la batería luego de realizar un número de ciclos de carga y descarga, en función de parámetros determinados por la descarga, como son el SOC inicial y final, el Crate, el DOD y la temperatura de la batería. Se introduce al contenido del artículo, se describe cómo se implementará el algoritmo al presente proyecto y se analizan las principales características de dicho artículo.

7.1. Modelado del Torque

En la presente sección se realiza el desarrollo el cálculo del par (torque) necesario en eje del motor para poner en movimiento al vehículo.

Se realizará un análisis de todas las fuerzas actuantes en el vehículo y se estudiarán las ecuaciones que rigen el movimiento. Finalmente se obtendrá el resultado del torque que debe entregar el motor con el fin de cumplir con las condiciones establecidas (velocidad, peso del vehículo, pendiente del recorrido, entre otras).

El análisis de esta sección se basó en un estudio previo [61], el cual detalla de manera exhaustiva el comportamiento del vehículo eléctrico durante el movimiento.

7.1.1. Descripción general del movimiento del vehículo

El movimiento de un vehículo en una dirección está completamente determinado por todas las fuerzas actuando en dicha dirección. La figura 7.1 muestra las fuerzas actuando en un vehículo subiendo una pendiente. El **esfuerzo de tracción**, denominado en la figura 7.1 como F_t , en el área de contacto entre las cubiertas de las ruedas y la superficie del camino, hace que el vehículo se mueva hacia adelante. Cuando el vehículo se esta moviendo, existe una fuerza resistente que intenta detener su movimiento. Dicha fuerza resistente usualmente esta compuesta por la fuerza de rozamiento, la resistencia aerodinámica, y la componente del peso debido a la pendiente de la superficie del camino.

Según la segunda ley de Newton, la aceleración del vehículo se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\delta M}$$
(7.1)

Donde V es la velocidad del vehículo, $\sum F_t$ el esfuerzo de tracción total del vehículo (el cuál es de particular interés conocer para hallar el par total a la salida del motor), $\sum F_r$ es la resistencia total, M la masa total del vehículo, y δ es el factor de masa equivalente. Dicho factor se utiliza para convertir las inercias rotativas de las componentes rotacionales en masas traslacionales. Se define una expresión para este factor, más adelante en la ecuación 7.20.

7.1. Modelado del Torque



Figura 7.1: Fuerzas actuando sobre el vehículo en una pendiente.

7.1.2. Resistencia del vehículo

Como se observa en la figura 7.1, la resistencia del vehículo que se opone al movimiento, esta compuesta por 3 tipos de resistencias. La **resistencia de rodaje** causada por el rozamiento entre las cubiertas de la rueda con el suelo, que se definen en la figura como T_{rf} (Torque de rozamiento de la rueda de adelante, "front") y T_{rr} (Torque de rozamiento de la rueda trasera, rear"), la **resistencia aerodinámica** F_w , y la **resistencia debido al peso** según la inclinación del terreno $M \cdot g \cdot sen(\alpha)$. Estos tres tipos de resistencia serán discutidos a continuación con más detalle.

7.1.2.1. Resistencia a la rodadura

La resistencia de rodaje de la rueda en superficies duras es principalmente producida por la histéresis en los materiales de la cubierta. La figura 7.2 muestra una cubierta en estado estacionario, en la cual, la fuerza P esta actuando en el centro. La presión en el área de contacto entre la cubierta y el suelo esta distribuida simétricamente a ambos lados de la linea central y la fuerza resultante, P_z , está alineada con la fuerza P. Capítulo 7. Consideraciones para el modelado



Figura 7.2: Distribución de la presión en el área de contacto.

La deformación Z, contra la carga P, en los procesos de carga y descarga se muestra en la figura 7.3. Debido a la histéresis en la deformación del material caucho, la fuerza P es mayor cuando se carga que cuando se descarga, para una misma deformación Z, según se muestra en la figura 7.3.



Figura 7.3: Fuerzas actuando en la cubierta contra la deformación de la cubierta en carga y descarga.

Cuando la cubierta está rodando, como se muestra en la figura 7.4, la misma desde la mitad hacia adelante se está cargando, y de la mitad hacia atrás se está descargando. En consecuencia, la histéresis causa una distribución asimétrica en las fuerzas de reacción. La presión en la parte de adelante de la cubierta es mayor que en la parte de de atrás, como se muestra en la figura 7.4. La fuerza de reacción del suelo se desplaza casi completamente a la mitad delantera.

El momento producido por el desplazamiento hacia adelante de la fuerza de reacción resultante, es denominado momento de resistencia de rodadura, como se observa en la figura 7.4(a), y puede expresarse como:

$$T_r = P \cdot a \tag{7.2}$$

Para mantener rodando la rueda, se necesita una fuerza F actuando en el centro de la rueda, para balancear este momento de resistencia de rodadura. Ésta fuerza se expresa de la siguiente manera:

$$F = \frac{T_r}{r_d} = \frac{P \cdot a}{r_d} = P \cdot f_r, \tag{7.3}$$

dónde r_d es el radio efectivo de la rueda y $f_r = \frac{a}{r_d}$ es llamado coeficiente de rozamiento. De ésta manera, el momento de resistencia de rodadura puede ser reemplazado equivalentemente por una fuerza horizontal actuando en el centro de la rueda en la dirección opuesta al movimiento. Esta fuerza equivalente es denominada fuerza de resistencia de rodadura, y se expresa como:

$$F_r = P \cdot f_r, \tag{7.4}$$

donde P es la fuerza normal actuando en el centro de la cubierta en movimiento. Cuando el vehículo está situado en una colina, la carga normal, P, se reemplaza por la componente que es perpendicular al suelo de la superficie. Esto es :

$$F_r = P \cdot f_r \cdot \cos(\alpha), \tag{7.5}$$

donde α es el ángulo de la inclinación, tal como se indica en la figura 7.1.

Capítulo 7. Consideraciones para el modelado



Figura 7.4: Deformación de la cubierta y resistencia de rodaje en (a) superficie dura, y (b) superficie blanda.

La fuerza de resistencia de rodadura f_r , es una función del material de la rueda, su estructura, temperatura, la presión de aire interna, geometría, rugosidad de la carretera, material de la carretera y la presencia o ausencia de humedad en la misma.

Estado	Resistencia de rodadura f_r
Ruedas de automóvil en calle de concreto o asfalto	0.0013
Ruedas de automóvil en calle de gravilla	0.02
Calle asfaltada en base a alquitrán	0.025
Calle sin pavimentar	0.05
Campo	0.1-0.35
Rueda de camión en calle de concreto o asfalto	0.006-0.001
Rueda en rieles de hierro	0.001-0.002

Tabla 7.1: Valores de resistencias de rodadura f_r .

Los valores típicos del coeficiente de rozamiento f_r se muestran en la figura 7.1. Los valores de dicha tabla no tienen en cuenta la variación con la velocidad.

Basados en resultados experimentales, se han propuesto muchas fórmulas empíricas para calcular el coeficiente de rozamiento de rodadura en superficies duras. Por ejemplo, para un auto de pasajeros en una carretera de concreto, el coeficiente f_r puede ser calculado según la siguiente expresión:

$$f_r = f_0 + f_s \left(\frac{V}{100}\right)^{2,5},\tag{7.6}$$

7.1. Modelado del Torque

donde V es la velocidad del vehículo en km/h y f_0 y f_s dependen de la presión de aire en la rueda.

En el cálculo del rendimiento del vehículo, es suficiente con considerar que f_r es una función lineal con la velocidad. La siguiente ecuación puede ser utilizada para vehículos comunes de pasajeros, para un rango común de presión de aire:

$$f_r = 0.01 \left(1 + \frac{V}{160} \right) \tag{7.7}$$

Ésta ecuación predice el valor de f_r con una exactitud aceptable para velocidades menores a 128 km/h.

7.1.2.2. Resistencia aerodinámica

Un vehículo que viaja a una velocidad particular, encuentra en el aire una fuerza que resiste su movimiento. Ésta fuerza es la relacionada con el arrastre aerodinámico. Está compuesta principalmente por dos componentes; la forma del vehículo y la fricción de la "piel" del vehículo.

Forma del vehículo: El movimiento hacia adelante del vehículo empuja el aire delante de él. Sin embargo, el aire no puede moverse instantáneamente, lo que resulta en una mayor presión de aire en la parte frontal del vehículo. Adicionalmente, el aire en la parte de atrás del vehículo no puede llenar instantáneamente el espacio vacío producido por el movimiento del vehículo, lo que produce una baja presión de aire en la parte de atrás del vehículo.

El movimiento del vehículo, crea dos zonas de diferentes presiones que se oponen al movimiento, empujando(presión alta en la parte delantera), y atrayendo (presión baja en la parte trasera), como se muestra en la figura7.5.

Fricción de la "piel" del vehículo: El aire cerca de la piel del vehículo se mueve casi a la misma velocidad del vehículo, mientras que el aire alejado del vehículo permanece inmóvil. Entre medio, las moléculas de aire tienen un gran rango de velocidades. La diferencia de velocidad entre dos moléculas produce una fricción que resulta la segunda componente del arrastre aerodinámico.



Figura 7.5: Forma de arrastre del vehículo.

Capítulo 7. Consideraciones para el modelado

El arrastre aerodinámico es una función de la velocidad del vehículo V, el área frontal del vehículo A_f , la forma del vehículo C_D , la densidad del aire ρ :

$$F_W = \frac{1}{2} \rho A_f C_D \left(V - V_W \right)^2$$
(7.8)

donde V_W es la componente de la velocidad del viento en la dirección del movimiento del vehículo. Si la dirección del viento es en la misma dirección que la del vehículo, entonces V_W tiene un valor positivo, en caso contrario V_W posee valor negativo.

Valores típicos del coeficiente C_D de la forma del vehículo se observan en la figura 7.6.

Tipo d	le vehículo	Coeficiente de resistencia aerodinámica
	Convertible	0.50.7
	Carrocería tipo Van	0.50.7
	Carrocería tipo Ponton	0.40.55
	Carrocería en forma de cuña. Con faros integrados al cuerpo del vehiculo.	0.30.4
	Faros y todas las ruedas integradas al cuerpo del vehículo.	0.20.25
	Carrocería tipo "k-shaped"	0.23
	Carrocería con diseño aerodinámico óptimo.	0.150.20
Camiones.		0.81.5
Buses.		0.60.7
Motocicletas.		0.60.7

Figura 7.6: Coeficiente de arrastre C_D para diferentes formas de vehículos.

7.1.2.3. Resistencia debido al ángulo

Cuando un vehículo sube o baja una pendiente, su peso produce una componente que siempre se dirige hacia abajo, como se observa en la figura 7.7.

7.1. Modelado del Torque



Figura 7.7: Vehículo subiendo una pendiente.

Ésta componente se opone al movimiento del vehículo (superficie en subida), o ayuda al movimiento (superficie en bajada). Para el análisis del rendimiento del vehículo, solo se considera el peor caso que es cuando estamos en una superficie en subida. La componente de la fuerza peso en dirección del vehículo se expresa como:

$$F_q = Mg \cdot sen(\alpha). \tag{7.9}$$

Otra forma de estudiar lo anterior, es considerar que la resistencia debido al ángulo y la resistencia de rodadura se expresan juntas de la siguiente manera, denominadas resistencias del camino:

$$F_{rd} = F_f + F_g = Mg(f_r cos(\alpha) + sen(\alpha))$$
(7.10)

7.1.3. Ecuación dinámica

En la dirección longitudinal, las fuerzas actuando en un vehículo de dos ejes son las que se muestran en la figura 7.1, las cuales incluyen las fuerzas de rozamiento de las ruedas de adelante (front) y de atrás (rear) F_{rf} y F_{rr} , las cuáles están representadas por los torques T_{rf} y T_{rr} , el arrastre aerodinámico F_W , la resistencia debido a la fuerza peso F_g ($Mg \cdot sen(\alpha)$), y las fuerzas de tracción del tren delantero y trasero F_{tf} , F_{tr} que es lo que nos interesa calcular para conocer el Torque en las ruedas del vehículo. En el caso que el vehículo sea de tracción delantera, $F_{tr} = 0$, y en el caso que sea de tracción trasera, $F_{tf} = 0$.

La ecuación dinámica del vehículo en su movimiento longitudinal se expresa como:

$$\delta M \frac{dV}{dt} = (F_{tf} + F_{tr}) - (F_{rf} + F_{rr} + F_W + F_g)$$
(7.11)

89

Capítulo 7. Consideraciones para el modelado

Dónde $\frac{dV}{dt}$ es la aceleración lineal del vehículo en la dirección longitudinal, M la masa del vehículo y δ el factor rotacional de inercia. El primer término a la derecha de la ecuación 7.11 es el esfuerzo total de tracción, mientras que el segundo término es la resistencia total.

Para predecir el máximo esfuerzo de tracción que el conjunto rueda-suelo puede soportar sin deslizar y desestabilizare, se debe calcular la fuerza normal en el eje delantero y trasero (dependiendo el tipo de tracción que tengamos). Si se suman todos los momentos de todas las fuerzas actuando en el punto R (centro del área de la rueda y el suelo), *la fuerza normal en el eje delantero* W_f se determina de la siguiente manera:

$$W_f = \frac{MgL_bcos(\alpha) - (T_{rf} + T_{rr} + F_wh_w + Mgh_gsen(\alpha) + Mh_gdV/dt)}{L}$$
(7.12)

Similarmente, la fuerza normal actuando en el eje trasero W_r se determina como:

$$W_r = \frac{MgL_a cos(\alpha) + (T_{rf} + T_{rr} + F_w h_w + Mgh_g sen(\alpha) + Mh_g dV/dt)}{L}$$
(7.13)

Para un auto de pasajeros, la altura del centro de aplicación de la resistencia aerodinámica, h_w , se asume que está cercano al centro de gravedad del vehículo, h_g (ver h_g en figura 7.7).

7.1.3.1. Esfuerzo de tracción máximo

El esfuerzo de tracción máximo que puede soportar el contacto entre el neumático y el suelo (cualquier pequeña cantidad por encima de éste esfuerzo de tracción máximo hará que el neumático gire en el suelo) generalmente lo describe el producto de la carga normal y el coeficiente de adhesión a la carretera, μ , también denominado en algunas literaturas como coeficiente de rozamiento.

Para un vehículo con tracción delantera, el esfuerzo de tracción máximo se expresa como:

$$F_{t max} = \mu W_f \tag{7.14}$$

mientras que para un vehículo de tracción trasera se expresa como:

$$F_{t max} = \mu W_r \tag{7.15}$$

En el funcionamiento del vehículo, el máximo esfuerzo de tracción en las ruedas transmitido desde la planta de energía, no debe superar los valores establecidos en las ecuaciones 7.14 y 7.15, de lo contrario, las cubiertas del vehículo pueden llegar rodar deslizando, causando la inestabilidad del vehículo.

La tabla 7.2 muestra los coeficientes de rozamiento promedios para varios tipos de suelos de carreteras.

7.1. Modelado del Torque

Superficie	Valores pico μ_p	Valores de deslizamiento μ_s
Asfalto, concreto (seco)	0.8-0.9	0.75
Concrete (húmedo)	0.8	0.7
Asfalto (húmedo)	0.5-0.7	0.45-0.6
Gravilla	0.6	0.55
Camino de tierra (seco)	0.68	0.65
Camino de tierra (húmedo)	0.55	0.4-0.5
Nieve (compacta)	0.2	0.15
Hielo	0.1	0.07

Tabla 7.2: Coeficientes de rozamiento promedio en varios tipos de superficies.

Observación: El esfuerzo de tracción máximo para que el vehículo no se inestabilice no es tenido en cuenta al momento de realizar las simulaciones.

7.1.4. Tren de fuerza y velocidad del vehículo

Un tren de fuerza automotriz, como el que se muestra en la figura 7.8, consiste en una planta de energía (motor de combustión o motor eléctrico), un embrague en transmisión manual o un convertidor de torque en transmisión automática, una caja de cambios, el diferencial, el eje y las ruedas. El embrague es usado en transmisiones manuales para acoplar o desacoplar la caja de cambios a la planta de energía, mientras que el convertidor de torque en transmisiones automáticas es un dispositivo hidrodinámico, que funciona como el embrague en transmisiones manuales pero con una variación de cambios continua.

El torque y la velocidad de rotación del eje de salida de la planta de energía se transmiten a las ruedas impulsadas a través del embrague o convertidor de par, caja de cambios, transmisión final, diferencial y eje de transmisión.



Figura 7.8: Tren de fuerzas de un automóvil.

Capítulo 7. Consideraciones para el modelado

El **torque en las ruedas**, transmitido desde la planta de energía se expresa de la siguiente manera:

$$T_w = i_g i_0 \eta_t T_p \tag{7.16}$$

Donde T_W es el torque que produce las ruedas del vehículo, T_p es el torque de salida que produce la planta del sistema (en este caso el torque a la salida del motor eléctrico), i_g es la relación de velocidades de la transmisión definida como $i_g = N_{in}/N_{out}$, donde N_{in} es la velocidad angular de entrada, y N_{out} la velocidad angular de salida, i_0 es la relación de velocidades de los engranajes finales y η_t el rendimiento de la linea de transmisión, el cual considera todas las perdidas mecánicas que se tienen en dicha línea de transmisión.

Por lo tanto, el torque que se necesita saber es el que produce las ruedas del vehículo, que es T_W , el cuál se calcula como:

$$T_W = F_t r_d \tag{7.17}$$

dónde $F_t = F_{tf} + F_{tr}$ se obtiene de la ecuación 7.11, y r_d es el radio efectivo de la rueda, como se observa en la imagen 7.9



Figura 7.9: Fuerza de tracción y torque en una rueda.

En el caso del vehículo puramente eléctrico, al tener una sola transmisión, el valor de la multiplicación de $i_g \cdot i_0$ es constante, la cual se denomina relación de transmisión (o también "gear ratio"). Esta constante depende del vehículo en cuestión.

Si se desea saber el valor de la velocidad traslacional del centro de la rueda en m/s del vehículo eléctrico, se debe realizar la siguiente operación:

$$V = \frac{\pi N_p r_d}{30 i_g i_0} \quad (m/s)$$
(7.18)

Donde V es la velocidad del vehículo en (m/s), N_p es la velocidad de rotación del eje del motor en rpm, r_d el radio de la rueda según la figura 7.9 y $i_g \cdot i_0$ es valor de la relación de transmisión.

7.1.5. Torque en las ruedas del vehículo

Según la ecuación 7.11, la fuerza de tracción total entregada por la planta queda determinada por:

$$F_t = F_r + F_W + F_g + \delta M \frac{dV}{dt}$$
(7.19)

Donde $F_r = Mg \cdot f_r \cdot cos(\alpha)$

Que en el caso de un camino de concreto $f_r \simeq 0.01(1 + \frac{V}{160})$, siendo V la velocidad en m/s del vehículo, y α el ángulo de inclinación de la carretera con respecto a la horizontal.

$$F_W = \frac{1}{2}\rho A_f C_D \left(V - V_W\right)^2$$

 $F_g = Mg \cdot sen(\alpha)$

 δ es el factor rotacional de inercia, el cuál se expresa de la siguiente manera:

$$\delta = 1 + \frac{I_W}{Mr_d^2} + \frac{i_0^2 i_g^2 I_p}{Mr^2}$$
(7.20)

Dónde I_W es la inercia del momento angular total de las ruedas e I_p es la inercia del momento angular total de las componentes rotativas asociadas con la planta de energía.

En caso que no se conozcan dichos parámetros anteriores, para un vehículo de pasajeros, se puede estimar δ utilizando la siguiente relación [61]:

$$\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2 (i_q i_0)^2$$

Donde δ_1 puede estimarse en 0.04 y δ_2 en 0.0025 Finalmente, el torque en las ruedas se expresa como:

$$T_t = F_t \cdot r_d$$

Con lo cuál, la ecuación que describe el torque de tracción en las ruedas es:

$$T_{t\,ruedas} = r_d \left[Mg \cdot \cos(\alpha) \cdot 0.01(1 + \frac{V}{160}) + \frac{1}{2}\rho A_f C_D \left(V - V_W \right)^2 + Mg \cdot sen(\alpha) + \delta M(dV/dt) \right]$$
(7.21)

Capítulo 7. Consideraciones para el modelado

Y el torque de tracción en la planta es

$$T_{t\,planta} = \frac{T_{t\,ruedas}}{i_g i_0 \eta_t} \tag{7.22}$$

Finalmente la ecuación 7.22 es la que se utiliza para describir el torque en el motor. Este modelado del torque es el que luego se buscará implementar en el software Matlab-Simulink (ver sección 8.5).
7.2. Modelado del Motor

Anteriormente en la sección 3.2.2 se desarrolló la temática de los tipos y funcionamiento de motores utilizados en aplicaciones para vehículos eléctricos.

En la presente sección se explicará la forma en que se modelará el motor del vehículo eléctrico, el cual luego será implementado en el software (ver desarrollo en 8.7.1).

Se detallan en la presente sección las principales estrategias para el modelado y el control de las principales variables que intervienen en su funcionamiento.

El modelo de motor utilizado está basado en un motor mapeado y una lógica que define su funcionamiento dependiendo del torque que sea requerido.

Se ha optado por utilizar este tipo de modelado ya que permite realizar simulaciones rápidas y es especialmente útil cuando no se conocen demasiados parámetros del motor.

Para realizar el modelado del motor es necesario conocer algunos datos básicos como son la potencia máxima y el torque máximo del mismo. A partir de estos datos y recordando el andamiento de estas variables en función de la velocidad del motor (ver figura 7.10) se pueden definir diferentes puntos de operación.



Figura 7.10: Torque y potencia reales en función de velocidad para la Renault Kangoo ZE.

La figura anterior muestra dicho andamiento particular para el vehículo Renault Kangoo ZE.

A partir del torque máximo y potencia máxima se halla la velocidad ω^* tal que

Capítulo 7. Consideraciones para el modelado

 $\omega^* = \frac{P_{max}}{T_{max}} \text{ (en la figura 7.10 esta velocidad es la que corresponde a } v^*\text{).}$

Esta velocidad será necesaria para discernir acerca del torque que realmente podrá entregar el motor.

La lógica a implementar será la siguiente:

- Caso 1 Si el vehículo se encuentra circulando a cierta velocidad v_1 , si dicha velocidad es menor que v^* (definida previamente) entonces el motor podrá entregar el torque máximo del motor $T_{max} \Longrightarrow T_{1max} = T_{max}$
- Caso 2 Si la velocidad del vehículo v_2 , es mayor que v^* , entonces deberá limitarse el torque del motor para que no se exceda la potencia máxima que puede dar. El torque que se podrá entregar en este caso está limitado por un valor que llamaremos $T_{2max} \Longrightarrow T_{2max} \leq T_{max}$.

En el presente modelado se limitará el valor del torque según la potencia máxima y la velocidad del siguiente modo: $T_{2max} = \frac{P_{max}}{\omega_2}$

Hubiera sido beneficioso para el modelado poder contar con las curvas exactas (como las de la figura 7.10) de forma de poder limitar correctamente el torque en los casos que se tienen velocidades mayores a v^* (Caso 2). Sin embargo esto no fue posible ya que no se encontraron curvas con valores reales para todos los vehículos. Debido a esto se optó por realizar el procedimiento descripto. Lo beneficioso de utilizar este procedimiento es que resulta aplicable para todos los vehículos que se deseen implementar.

A modo de ejemplo se muestra en la figura 7.11 el torque en función de la velocidad (km/h) en donde los valores límite fueron hallados siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.



Figura 7.11: Torque en función de velocidad para el caso de la Renault Kangoo ZE.

Se puede observar que el andamiento de la curva anterior se asemeja al andamiento real mostrado en la figura 7.10.

Como se explicó anteriormente, la lógica implementada es necesaria para poder determinar el torque que efectivamente puede entregar el motor. Luego de tener este valor, se procede a una segunda parte del modelado del motor.

Al contar con los datos de torque que entrega el motor (T_{mot}) y teniendo la velocidad del motor (ω_{mot}) se procede a calcular la potencia mecánica como:

$$P_{mec} = T_{mot}.\omega_{mot}$$

Luego se procede a utilizar una tabla de eficiencias (previamente cargada), a la cual se ingresa con datos de torque del motor (determinado anteriormente) y velocidad del motor. Para cada valor de torque y velocidad dados, le corresponde un valor de eficiencia (η) del motor.

El valor obtenido de eficiencia del motor se utiliza para hallar la potencia de las pérdidas de la forma: $P_{perdidas} = P_{elec}(1-\eta) = P_{mec} \cdot (1/\eta - 1)$

Una vez conocido el valor de las pérdidas se procede a calcular la corriente que toma el motor como:

$$I_{motor} = \frac{P_{mec} + P_{perdidas}}{V_{bateria}}$$

La corriente obtenida mediante el procedimiento anterior es la que el motor le va a demandar al paquete de baterías.

Vale la pena mencionar que en el presente modelado se utiliza la misma tabla de eficiencias para todos los vehículos, esto hace que se tenga un modelado versátil, ya que es aplicable a varios modelos de vehículos. Como contrapartida se pierde precisión ya que muchos de estos valores de eficiencia serán distintos para el motor real. Se decidió utilizar este tipo de implementación debido a la poca información precisa que se encontró sobre los motores de los distintos vehículos.

7.3. Modelado de la batería

Como se ha comentado anteriormente, las baterías y su funcionamiento bajo distintos usos en el vehículo eléctrico son uno de los principales focos del presente proyecto.

Tal como se ha desarrollado en el punto 4.4.3 existen varias composiciones químicas de baterías disponibles en el mercado para su uso en vehículos eléctricos. En la presente sección se desarrollará un modelado que dependerá del tipo de química que se desee implementar, se detallarán las principales variables a tener en cuenta y las hipótesis consideradas en los distintos casos.

Todas estas consideraciones del modelado luego serán implementadas en el software tal como se explicará en el punto 8.7.1.

La batería será modelada teniendo en cuenta los efectos de la autodescarga, la cual se estimó en un 8% mensual de la capacidad máxima. Dicha estimación (que es utilizada para todos los tipos de química implementadas ya que todas son de litio) se basa en que la autodescarga varía en función del estado de carga que se tenga (mayor autodescarga a mayores SOC) y en función de la temperatura (a mayor temperatura mayor autodescarga) [62]. Se asume una autodescarga del 8% mensual ya que se supone que se está en un caso intermedio, de temperaturas moderadas ($25\sim35^{\circ}$ C) y SOC medios.

Considerando lo anterior, se modela la corriente por la batería (I_{bat}) como la corriente que demanda el motor (definida en el modelado 7.2) sumado a la corriente de autodescarga.

Para el modelado de la batería considera el circuito equivalente Thévenin de la figura 7.12.



Figura 7.12: Circuito equivalente del modelo de la batería utilizado.

En el circuito de la figura 7.12, el valor de OCV representa el voltaje de circuito abierto de la batería (tensión en bornes de la batería cuando se encuentra sin carga externa conectada), R_{int} representa la resistencia interna de la batería y V_{Rint} es el valor de la caída de tensión en dicha resistencia. El valor que se utilizará para referirse al voltaje en bornes de la batería se representa como V_{bat} . Para el modelado se utilizan curvas previamente conocidas que parametrizan el andamiento del OCV y R_{int} , las cuales dependen de las siguientes variables:

- OCV = f(SOC), variable con el SOC
- $R_{int} = f(SOC, T)$, variable con el SOC y temperatura (T)

Para el caso del OCV, dependiendo del modelo y del tipo especifico de batería que se esté utilizando se tendrán entonces distintas curvas. Para modelar estas curvas se optó por utilizar un modelado [63] que tiene en cuenta el tipo de química deseada.

Se considera que, para los vehículos eléctricos, las baterías se descargarán como mínimo a un 10 % del SOC y se cargarán como máximo a un 90 % del SOC (tal como se mencionó en 4.4.4). De esta forma, la batería nunca se descarga totalmente, ni se carga a pleno, funcionando en un margen de seguridad. Las ecuaciones que determinan las curvas (tomadas del artículo [63]) describen la tensión de las celdas en un rango de SOC desde el 0 % al 100 %, por lo que es necesario limitar la parte útil de las curvas, considerando que un 0 % de carga equivale realmente a un 10 %, y el 100 % a un 90 %.

Tal como se desarrolló en el capítulo 5, las químicas utilizadas en los vehículos implementados son: LMO (Litio óxido de Manganeso), LFP (Litio Hierro Fosfato) y NMC (Litio Níquel Manganeso Cobalto). En las figuras 7.13, 7.14 y 7.15, se observan las curvas de tensión de circuito abierto de celda cargadas en el modelo para cada química (en rojo). En las tres curvas se aprecia en color azul la curva de tensión de celda calculada con las ecuaciones presentadas por el artículo [63] y en rojo la curva que será utilizada por el software para cada tipo de batería mencionado (recorte entre el 10 % y 90 %, normalizado nuevamente entre 0 % y 100 %).



Figura 7.13: Tensión de vacío contra SOC para batería NMC

Figura 7.14: Tensión de vacío contra SOC para batería LMO

Capítulo 7. Consideraciones para el modelado



Figura 7.15: Tensión de vacío contra SOC para batería LFP

Para el cálculo de la resistencia interna de la batería, se realiza un procedimiento similar, con la diferencia que en este caso no se encontraron datos fidedignos de resistencia interna dependiendo del tipo de química utilizada. Se opta por utilizar una misma curva de $R_{int} = f(SOC, T)$ para todas las baterías de litio a implementar. Las curvas de resistencia interna utilizadas tendrán un andamiento similar a los presentados previamente en la figura 4.10, donde se puede observar la dependencia de dicha resistencia con el SOC y la temperatura (T).

Una vez determinados el OCV y la R_{int} se procede a calcular la tensión en la batería como:

$$V_{bat} = OCV - R_{int}I_{bat} \tag{7.23}$$

Con el valor obtenido de V_{bat} se procede a hallar las potencias involucradas, para posteriormente hallar la energía consumida.

Hallando la potencia total del paquete de baterías (P_{bat}) se tiene que:

$$P_{bat} = P_{elect_{motor}} + P_{R_{int}} + P_{SSAA} \tag{7.24}$$

En la ecuación 7.24 el valor de $P_{elect_{motor}}$ corresponde a la potencia eléctrica que debe ser entregada al motor para cumplir con la consigna del torque solicitado, su valor se obtiene como $P_{elect_{motor}} = V_{bat}I_{bat}$.

La potencia $P_{R_{int}}$ corresponde al valor de las pérdidas en la resistencia interna de la batería y se calcula como $P_{R_{int}} = V_{R_{int}}I_{bat}$.

Finalmente se considera dentro del modelado la potencia asociada a los servicios auxiliares del vehículo (por ejemplo aire acondicionado), el cual también afectará al rendimiento del mismo. Este valor de potencia se modelará como un valor fijo para todos los vehículos. Las lógicas de la implementación desarrolladas posteriormente en la sección 8.7.1 evaluarán si el usuario ha encendido los SSAA y en ese caso se incluirá dicho consumo para calcular la potencia del paquete de baterías.

7.3. Modelado de la batería

Todas las potencias anteriores afectarán el funcionamiento del vehículo y serán de importancia al momento de hallar la energía consumida por el mismo. Se modela la energía consumida por el vehículo como:

$$E_{cons} = \int_{t_1}^{t_2} P_{bat} dt \tag{7.25}$$

La energía consumida se utiliza posteriormente para calcular el estado de carga actual del vehículo. Si bien otras literaturas sugieren calcular el estado de carga de la batería como $SOC = SOC_{inicial} - \frac{1}{3600 \cdot C_{nom}} \int_{t_1}^{t_2} I_{bat} dt$ (conocido como el método de "Coulomb Counting"), en el presente documento se ha optado por hallar el estado de carga como se muestra a continuación:

$$SOC_{actual} = SOC_{inicial} - \frac{E_{cons}}{E_{bat}} 100$$
 (7.26)

El motivo de optar por calcular el SOC como se indica en la ecuación 7.26, se basa en que calcularlo por la energía consumida en la simulación es un método más preciso, ya que para utilizar el método de "Coulomb Counting", se necesita saber el valor de la Capacidad nominal de la batería en Ah, y muchos fabricantes no especifican su valor. Al no conocer dicho valor, se intentó calcular la capacidad en base al voltaje nominal de la batería, pero al hacerlo de dicho modo, el valor del SOC final puede diferir con la energía remanente en la simulación. Por otro lado, como en el software se conoce exactamente el valor de la tensión en la batería en todo momento (por más que sea una curva bastante plana), calcular el SOC utilizando la energía no es un problema, como si sería si se tuviera que medir en una batería real, debido a imprecisiones en la medida del voltaje, lo cual ocasionará errores en la estimación del estado de carga.

Como el modelo utilizado permite hallar correctamente tanto tensión como corriente por la batería, esto hace que sea posible hallar las potencias involucradas y por lo tanto tener una medida certera de la energía consumida (E_{cons}) , lo cual posibilitará hallar el SOC correctamente según la ecuación 7.26. Capítulo 7. Consideraciones para el modelado

7.4. Algoritmo del estado de salud (SOH)

Como se ha mencionado anteriormente, la determinación del estado de salud (SOH - State Of Health) de la batería frente a distintos usos es una de las principales temáticas a desarrollar en el proyecto.

Para lograr esto, en la presente sección se describirá el algoritmo utilizado, con el objetivo de estimar el estado de salud (SOH) de la batería en ciertos vehículos eléctricos. El algoritmo está basado en un artículo [38] de la Universidad de Chalmers, Gotemburgo, Suecia.

El algoritmo a desarrollar [38] tiene en cuenta resultados reales realizados mediante experimentos de laboratorio. Su desarrollo y los resultados a los que se arriban son aplicables a baterías que sean del tipo óxido de Litio Níquel Manganeso Cobalto (NMC).

A continuación se describirá dicho artículo, se analizarán las hipótesis consideradas y se desarrollaran las estrategias con el fin de implementarlo correctamente en el software.

7.4.1. Resumen

En la actualidad la mayoría de los nuevos vehículos eléctricos utilizan baterías de óxido de Litio Níquel Manganeso Cobalto (NMC), ya que poseen mayor densidad de energía, menor costo y una vida útil más prolongada en comparación con otros tipos de química utilizadas (ver sección 4.4.3).

El algoritmo a implementar, propone una función que ajusta la capacidad remanente luego de realizar cierto ciclo de descarga para las baterías de química NMC.

Para la determinación del algoritmo fueron realizados múltiples ensayos sobre las baterías, que fueron testeadas durante 3 años. Cada batería fue descargada en umbrales del 10 % del SOC, a Crate fijos de 1C, 2C y 4C y luego cargada hasta el mismo valor de SOC inicial a un ritmo de $\frac{C}{8}$, siendo C la capacidad nominal. El modelo utilizado se basa entonces, en medidas de degradación de la capacidad en las baterías en el transcurso del tiempo de ensayo.

El modelo utiliza como variables de entrada: el SOC inicial, el SOC final, el Crate, la temperatura de la batería, la profundidad de descarga DOD y la cantidad de ciclos completos equivalentes (FCE, full cycle equivalent), los cuales equivalen a una descarga y una posterior carga completa (del 100 % al 0 % y del 0 % al 100 %).

7.4.2. Modelo desarrollado

En el trabajo referenciado se utilizó una batería NMC con una capacidad nominal de 26 Ah. Para utilizar el modelo con otras baterías NMC de diferente capacidad, basta con normalizar el ritmo de descarga dividiendo la corriente que efectivamente entrega la batería por la capacidad nominal de la misma, para así trabajar con el Crate.

El algoritmo estudia la capacidad remanente en la batería utilizando ciclos completos equivalentes (FCE), en los que se considera la descarga completa y su respectiva carga. Independientemente del ritmo de descarga, se considera que la carga se realiza a un Crate= $\frac{C}{8}$ (una carga completa en 8 horas). El número de FCE se calcula como $FCE = n \cdot (\frac{DOD}{100})$, siendo n la cantidad de ciclos reales que se realicen, y el DOD (%) la profundidad de descarga de la batería para dicho ciclo. Cada batería fue ciclada entonces en el mismo intervalo del 10% del SOC, por ejemplo entre el 30% y el 20%, siempre al mismo DOD y desde el mismo SOC inicial.

Luego, la capacidad remanente máxima de la batería en función de FCE se adapta en forma a la ecuación 7.27.

$$Capacidad(SOC, DOD, Crate, Temperatura, FCE) = a \cdot e^{b \cdot FCE} + c \cdot e^{d \cdot FCE}$$

$$(7.27)$$

La ecuación 7.27 representa la capacidad máxima remanente en Ah de la batería luego de realizados un número determinado de FCE repitiendo un mismo ciclo con su SOC inicial y final, DOD, Crate y Temperatura. La ecuación fue ajustada mediante los datos experimentales relevados al realizar las cargas (a $\frac{C}{8}$) y las descargas (a 1C, 2C, 4C) y diferentes niveles de SOC (tramos de a 10%), para las temperaturas de 25°C y 35°C. Con los datos recabados se ajustaron los parámetros a, b, c y d de forma de representar con el modelo los resultados experimentales.

Hay que remarcar que para lograr los datos que permiten realizar el modelo fueron necesarios 3 años de experimentos, es por ello que se utilizaron Crate de 1C, 2C y 4C. De haber utilizado Crate menores a 1C, seguramente el estudio hubiese llevado incluso más tiempo (para lograr envejecer las baterías).

Los parámetros de la ecuación 7.27 fueron entonces ajustados a través de los datos recabados, quedando determinados del siguiente modo:

$$a(SOC) = 6.2\frac{SOC}{90} + 0.093.$$
(7.28)

.

$$b(SOC, Crate) = \left(0, 98 \times \left(\frac{Crate}{2}\right)^{3,3} + 0,01741 \cdot \left(\frac{SOC}{20}\right)\right) \cdot \left(\frac{-0,6045}{SOC^{2,4}} - 5,512 \cdot 10^{-4}\right) \cdot \left(\frac{SOC}{20}\right)^{(0,05 \cdot Crate^3 - 0,35 \cdot Crate^2 + 1)}$$
(7.29)

$$c = 26 - a.$$
 (7.30)

103

Capítulo 7. Consideraciones para el modelado

Intervalo del SOC(%)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90
$d(25^{\circ}C, 2C)$	[-6.620	-3.210	-2.410	-3.700	-5.000	-2.550	-0.100	-0.010	$-0.001].10^{-6}$
$d(35^{\circ}C, 2C)$	[-3.042]	-1.000	-0.400	-4.730	-9.000	-7.67	-6.331	-7.000	$-0.7].10^{-6}$

Tabla 7.3: Dependencia del SOC y la temperatura para el parámetro d, a un Crate de 2C

A continuación se muestra la corrección del parámetro d
 según SOC y Crate, para una temperatura de 35°C.

 $\begin{aligned} d(Crate < 1, SOC < 50) &= d(2C, SOC) + (Crate - 1)(d(2C, 10 - 20) - d(1C, 10 - 20)), \\ d(Crate < 1, SOC \ge 50) &= d(2C, SOC) + (Crate - 1)(d(2C, 60 - 70) - d(1C, 60 - 70)), \\ d(Crate < 2, SOC < 50) &= d(2C, SOC) + (2 - Crate)(d(2C, 10 - 20) - d(1C, 10 - 20)), \\ d(Crate < 2, SOC \ge 50) &= d(2C, SOC) + (2 - Crate)(d(2C, 60 - 70) - d(1C, 60 - 70)), \\ d(Crate > 2, SOC < 50) &= d(2C, SOC) + \frac{Crate - 2}{2}(d(2C, 10 - 20) - d(4C, 10 - 20)), \\ d(Crate > 2, SOC \ge 50) &= d(2C, SOC) + \frac{Crate - 2}{2}(d(2C, 60 - 70) - d(4C, 10 - 20)), \\ d(Crate > 2, SOC \ge 50) &= d(2C, SOC) + \frac{Crate - 2}{2}(d(2C, 60 - 70) - d(4C, 60 - 70)). \\ (7.31) \end{aligned}$

Observar que el parámetro **a** de la ecuación 7.28 es lineal con el SOC, el parámetro **b** de la ecuación 7.29 depende del Crate y del SOC, el parámetro **c** de la ecuación 7.30 depende del parámetro a (y por lo tanto del SOC). En cuanto al parámetro **d**, era muy complejo hallarle una ecuación que aproximara los resultados experimentales, ni siquiera una ecuación de 4to orden pudo aproximarse a los datos con exactitud. Es por esto que los autores decidieron utilizar una tabla de referencia, la cual indica el valor del parámetro **d** en función del valor del SOC, para Crates y temperaturas fijas. La tabla 7.3 muestra los diferentes valores del parámetro **d**, para un Crate fijo de 2C.

Para utilizar otros Crate, se utiliza la corrección del factor **d**, como se observa en 7.31. En el artículo estudiado [38], no figuran los valores de d(1C, 10-20), d(1C, 60-70), d(4C, 10-20) y d(4C, 60-70) que se utilizan en 7.31. En consecuencia de ello, se contactó a los autores y afortunadamente se consiguió la respuesta de Evelina Wikner, quién generosamente brindó los valores de dichos parámetros para el ajuste a 35° C.

Finalmente, como los ensayos se realizaron controlando dos temperaturas de la batería ($25^{\circ}C$ y $35^{\circ}C$), para temperaturas diferentes a estas, los autores realizan una aproximación lineal para el parámetro **d** entre esas dos temperaturas.

Para poder hallar el SOH, también se utiliza el concepto de "capacidad perdida", la cual es simplemente la resta entre la capacidad máxima inicial menos la remanente determinada por la ecuación 7.27.

Luego de esto se puede calcular el estado de salud de la batería como:

$$SOH = SOH_{inicial} - \frac{Capacidad_{perdida}}{Capacidad_{nominal}}$$
(7.32)

104

7.4. Algoritmo del estado de salud (SOH)

Donde $SOH_{inicial}$ es el estado de salud con que se comienza el estudio. Un valor de $SOH_{inicial} = 100\%$ equivale a una batería nueva.

A modo de ejemplo de aplicación del algoritmo, si para una aplicación particular una batería se utiliza normalmente entre un 50 % y un 20 % del SOC, para saber cuántos ciclos de vida útil (ciclos n) tendrá la batería en esas condiciones, se debe tener en cuenta la pérdida de capacidad para cada uno de los intervalos del 10 % del SOC. La pérdida de capacidad de cada intervalo queda determinada por la resta entre la capacidad máxima inicial menos la remanente determinada por la ecuación 7.27 para cada uno de los intervalos. Entonces para cada intervalo del 10 %, corresponderá un parámetro **d**. Un valor corresponde al SOC entre el 20 % y 30 %, otro que corresponde al de 30 % a 40 %, y el último que corresponde entre al intervalo de 40 % a 50 %. El parámetro **d** dependerá de la temperatura seleccionada según 7.3, y también del Crate. Los ensayos fueron realizados al mismo Crate, por lo tanto, el artículo no incluye ninguna aproximación y considera que se utilizará el SOC promedio de cada recorrido.

Para determinar la cantidad de ciclos \mathbf{n} de vida útil, se puede hallar el FCE de la ecuación 7.27 tal que el SOH sea un 80 %. Obtenido el valor de FCE, se calcula la cantidad de ciclos reales \mathbf{n} de la siguiente forma:

$$n = \frac{FCE \cdot 100}{DOD} \tag{7.33}$$

Para el caso del ejemplo, el DOD = 30%, SOC inicial = 50% y SOC final = 20%.

Es comúnmente utilizado el valor de 80 % en el SOH para referirse a que a partir de dicho valor es conveniente realizar un cambio de baterías del VE. Este criterio es utilizado comúnmente en la industria de los VE, por ejemplo en Estados Unidos, la USABC (U.S. Advanced Battery Consortium) utiliza este valor de 80 % [64].

De cualquier manera, la industria de los VE se ha fijado este límite de SOH más por razones comerciales que por impedimentos reales ya que efectivamente, las pérdidas de potencia y eficiencia aparecen cuando las baterías envejecen, pero en realidad no interfieren con la seguridad de la conducción. Sin embargo, la pérdida de capacidad de la batería, al estar directamente relacionada con el kilometraje que un VE puede recorrer con una batería completamente cargada, es más fácil de detectar que la pérdida de energía, es por esto que la pérdida de capacidad es la razón principal de esta limitación de SOH [65].

Por último, aunque el SOH de las baterías llegue a un 80%, ese vehículo seguirá cumpliendo con las necesidades de la mayoría de propietarios de VE, por lo que es posible igualmente extenderse de ese valor fijado en 80% [66].

Capítulo 7. Consideraciones para el modelado

7.4.3. Adaptaciones realizadas al modelo para aplicación en VEs

En esta sección se describen los principales cambios y consideraciones realizadas a la hora de aplicar el algoritmo del SOH al modelo desarrollado en Matlab.

7.4.3.1. Temperatura de la batería

Para el modelo realizado, se decidió utilizar la temperatura de la batería en 35° C. El artículo estudiado [38], utiliza una aproximación lineal (interpolación lineal) entre los valores ensayados (de 25° C y 35° C) lo cual se intenta evitar en la presente aplicación ya que no se tiene certeza de que efectivamente dicha relación sea lineal.

Como se mencionó anteriormente, uno de los autores, tuvo la cortesía de compartir los parámetros de ajuste del modelo para 35°C, y no se dispone de los valores para 25°C. Dicho esto, y considerando que la temperatura de 35°C es adecuada para una batería en funcionamiento, se optó por implementar el modelo para esta temperatura.

7.4.3.2. Capacidad utilizable de la batería

Generalmente, los vehículos eléctricos no utilizan el 100 % de la energía (kWh) o de la capacidad (Ah) de sus baterías (como se desarrolló en la sección 4.4.4). En algunos casos, los fabricantes declaran la energía útil y la total de la batería. En otros casos, se declara sólo la energía útil. En el artículo el modelo realizado considera que las baterías llegan a un 0% del SOC y se cargan hasta el 90% del mismo. Para el presente proyecto se decidió utilizar un 80% de la energía y la capacidad real de las baterías, considerando que la energía útil y accesible se encuentra entre el 10% y el 90% del SOC de la batería real. Para aclarar esto, en el modelo de cada vehículo se tiene la capacidad máxima **real** y la capacidad máxima **utilizable** de cada batería. Usualmente, sólo se conoce la **capacidad máxima utilizable**.

En el algoritmo del SOH, para determinar la capacidad real de la batería, se hace la siguiente aproximación:

$$Capacidad_max_utilizable = (Capacidad_max_real) \cdot 0,8$$
(7.34)

Al algoritmo de SOH se le ingresa desde el Workspace de Matlab la **capacidad máxima utilizable** de cada vehículo. Por lo tanto, para hallar la **capacidad máxima real** de la batería (que es la que necesita el algoritmo), se utiliza la ecuación 7.35:

$$Capacidad_max_real = \frac{Capacidad_max_utilizable}{0,8}$$
(7.35)

106

7.4. Algoritmo del estado de salud (SOH)

7.4.3.3. % de SOC utilizable escalado para el modelo vs % de SOC real

El algoritmo del SOH deberá utilizar los datos de capacidad real de la batería y de energía real de la batería. Ahora, con el modelado realizado, cuando la batería se encuentre al 10% de su capacidad real, el vehículo marcará en su tablero que la el SOC es de un 0%, ya que no hay energía utilizable disponible. Cuando se cargue el vehículo al 90% de la capacidad real, el vehículo marcará un 100% de carga.

Es entonces que para el cálculo del SOH, se obtiene el SOC **utilizable**, el cual es necesario escalarlo del 0 % al 100 % real, ya que el algoritmo realiza los cálculos con el SOC **real** de la batería.



Figura 7.16: Comparación entre SOC utilizable escalado y SOC real utilizable.

La figura 7.16 muestra como se transforma el SOC real entre el 10 % y 90 %, a SOC utilizable escalado entre 0 % y 100 %.

Para transformar el SOC utilizable escalado que brinda Simulink a SOC real para el algoritmo, se utilizan las siguientes ecuaciones:

- SOC utilizable escalado entre 100 % y 87.5 %: $SOC_real = \frac{(SOC_escalado - 87,5) \cdot (90 - 80)}{100 - 87,5} + 80$
- SOC utilizable escalado entre 87.5% y 75%: $SOC_real = \frac{(SOC_escalado - 75) \cdot (80 - 70)}{87,5 - 75} + 70$
- SOC utilizable escalado entre 75 % y 62.5 %: $SOC_real = \frac{(SOC_escalado - 62,5) \cdot (70 - 60)}{75 - 62,5} + 60$

Capítulo 7. Consideraciones para el modelado

- SOC utilizable escalado entre 62.5% y 50%: $SOC_real = \frac{(SOC_escalado - 50) \cdot (60 - 50)}{62,5 - 50} + 50$
- SOC utilizable escalado entre 50 % y 37.5 %: $SOC_real = \frac{(SOC_escalado - 37,5) \cdot (50 - 40)}{50 - 37,5} + 40$
- SOC utilizable escalado entre 37.5 % y 25%: $SOC_real = \frac{(SOC_escalado - 25) \cdot (40 - 30)}{37.5 - 25} + 30$
- SOC utilizable escalado entre 25 % y 12.5 %: $SOC_real = \frac{(SOC_escalado - 12,5) \cdot (30 - 20)}{25 - 12,5} + 20$
- SOC utilizable escalado entre $12.5\% \ge 0\%$: $SOC_real = \frac{(SOC_escalado - 0) \cdot (20 - 10)}{12,5 - 0} + 10$

Donde **SOC_escalado** es el % del SOC del intervalo en cuestión brindado por Simulink (SOC utilizable escalado), y **SOC_real** es el SOC real de cada intervalo a utilizar en el algoritmo de SOH.

El código Matlab con el nombre SOH_algoritmo.m (el cual se entrega con la presente documentación) es el que se utiliza para realizar los cálculos relacionados con el estado de salud de las baterías.

7.4.3.4. Consideraciones para el Crate

En el artículo estudiado, los ensayos fueron realizados para un Crate fijo, por lo que no era necesario distinguir entre tramos. Al simular un vehículo eléctrico se podrán tener tramos de corrientes muy diversas (debido a las exigencias del recorrido) y realizar una aproximación del Crate hallando el promedio de la corriente para todo el ciclo no parece lo más indicado. Es por esto, que para el Crate se hace el promedio del módulo de la corriente entregada por la batería para cada intervalo de 10 % del SOC, dividida por la capacidad nominal de la misma.

7.4.4. Análisis del modelo del SOH

En esta sección, se procederá a analizar el modelo realizado del SOH. Se estudiará cómo se comporta el SOH en base a los parámetros de entrada que afectan al mismo, como son la temperatura, el DOD, el SOC inicial y el Crate.

7.4.4.1. Deterioro de las baterías según DOD y SOC inicial

Dos de los parámetros de mayor influencia en la vida útil de las baterías de química NMC, según el algoritmo trabajado, son la profundidad de descarga o DOD y el SOC a partir del cual se realice el DOD. Se notará cómo mejora la vida útil de la batería al mantener DODs pequeños y también al evitar estados de carga iniciales altos (SOC iniciales altos).



Figura 7.17: Vida útil de la batería NMC en tres formas diferentes de uso.

La figura 7.17 ilustra 3 simulaciones realizadas, todas con la misma temperatura en la batería de 35° C y luego de realizados 1680 ciclos de carga y descarga. Se destaca que, manteniendo el mismo DOD (en este caso del 40% para las 2 curvas superiores), la vida útil de la batería se extiende al utilizar intervalos del SOC bajos. Esto se aprecia contemplando las dos gráficas superiores de la figura

Capítulo 7. Consideraciones para el modelado

7.17 (en color azul y rojo), donde la azul tendrá mayor vida útil siendo utilizada el rango entre el 50 % y el 10 % del SOC, mientras la roja se deteriora más rápido utilizándola entre el 90 % y el 50 % del SOC, a pesar de tener la misma profundidad de descarga. De la comparación entre la curva azul en la figura 7.17 y curva amarilla, correspondiente a un DOD del 80 %, comenzando desde el 90 % de la capacidad de la batería, se hace notorio el aumento del deterioro. A continuación se profundizará en el análisis del efecto de aumentar el DOD.



Figura 7.18: SOH en función de ciclos de descarga (n) para 40 % de DOD y 80 % de DOD.

El ejemplo de la figura 7.18 muestra el comportamiento del modelo para dos DOD distintos según varía el número de ciclos (n). Es fácil de apreciar que la relación es no es lineal para diferentes profundidades de descarga; ya que a mismas condiciones de temperatura y Crate, si se utiliza la mitad del DOD (de 80% a 40%), la vida útil de la batería aumenta 2.35 veces ($\frac{4434}{1884} = 2,35$) más en ciclado, aunque siempre estemos utilizando la batería en % de SOCs altos (90% / 50%). También se puede observar para la curva roja, que representa un DOD del 80%, cuando llega al 80% de su capacidad máxima, la curva azul que representa un DOD de 40% se encuentra por encima del 90%. Por otro lado, cuando la curva azul llega al 80% del SOH, la roja se encuentra por debajo del 60%. Puede observarse con el transcurso del ciclado (n) como aumenta la brecha entre las curvas, implicando

la importancia que tiene aumentar la profundidad de descarga.



Figura 7.19: SOH en función de ciclos de descarga (n) para mismos DOD y diferentes SOC.

Por otro lado, si se analiza la vida útil de la batería con el mismo DOD pero con diferentes estados de carga, se observa que la vida útil aumenta considerablemente si la batería se utiliza en % de SOC bajos, ya que observando el ejemplo de la figura 7.19, se ve que se puede aumentar la vida útil 4 veces ($\frac{18320}{4434} \simeq 4$) si se utiliza la misma en el intervalo de 50 % al 10 % del SOC, en lugar de utilizarla desde el 90 % al 50 % del SOC.



7.4.4.2. Dependencia de la vida útil según el Crate



Figura 7.20: Dependencia de la vida útil de la batería NMC según el Crate.

El gráfico 7.20 muestra que para las baterías NMC, la vida útil no es completamente decreciente con el aumento del Crate, sino que la misma tiene un máximo y luego comienza a decrecer.

En este caso, se grafica el comportamiento de la vida útil de la batería hasta un Crate de 1C, ya que para la aplicación en VEs, el Crate promedio es usualmente menor a 1C.

Se calculó que para 1680 ciclos, a una temperatura de 35°C, con DOD del 80 % y SOC entre 90 % y 10 %, el pico máximo de vida útil se da en un uso de la batería a 0.3461C.

Por otro lado, se observa que si el Crate es nulo, el SOH no es 100 % al cabo de 1680 ciclos. Esto es debido a la autodescarga de la batería. Pero en ese caso particular, tomaría años llegar a 1680 ciclos de autodescarga con un DOD del 80 %, con lo cual este caso de vida útil de la batería con Crate nulo no es de interés para una persona que utilice regularmente su VE.

7.4. Algoritmo del estado de salud (SOH)



7.4.4.3. Consideración de la temperatura

Figura 7.21: Dependencia de la vida útil de la batería NMC según la Temperatura.

En la figura 7.21 se observa la dependencia de la vida útil de la batería NMC con la temperatura. Se visualiza que a mayor temperatura, la vida útil de la batería decae. Esto es cierto para los valores precisos de 25° C y 35° C, ya que los autores del artículo estudiado [38] sólo realizaron ensayos para esas dos temperaturas. Como no se tienen otros ensayos a diferentes temperaturas, sería incierto decir que la temperatura varía linealmente entre esos dos puntos, o que a una temperatura menor a 25° C se tiene mayor vida útil. Los autores asumen una aproximación de hacer un modelo lineal entre 25° C y 35° C, pero eso no se puede verificar. Por lo tanto, para el modelo utilizado, sólo se asumirá como cierto que la batería tiene mayor vida útil si se utiliza a 25° C que a 35° C. La mencionada figura muestra los gráficos a una descarga de 2C, ya que es el único Crate del que se tienen la totalidad de datos (para 25° C) para calcular el SOH. Para ritmos de descarga distintos se tienen los parámetros para simular a 35° C.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 8

Modelo realizado en Simulink

Con el fin de realizar el modelado y generar la herramienta que permita realizar simulaciones de vehículos eléctricos en sus distintos tipos de uso, se optó por utilizar Matlab - MathWorks [67], en combinación con su herramienta Simulink, debido a la variedad de posibilidades que presenta para simular el comportamiento de sistemas dinámicos. Permite simular sistemas lineales y no lineales, modelos en tiempo continuo y tiempo discreto, por lo que es una herramienta que se ajusta a las exigencias del proyecto. Además, el uso de Matlab y Simulink permiten realizar programación en basada tanto en código de texto, cómo en programación visual mediante los bloques que facilita Simulink.

En el punto de partida del presente proyecto se optó por implementar un modelo desde cero, considerando los bloques definidos previamente en Simulink para las baterías, motor, conversores de electrónica de potencia y controladores. Habiendo realizado un modelo primitivo, los tiempos de simulación resultaron demasiado elevados y no permitieron continuar con el modelo realizado.

Indagando más sobre aplicaciones en Simulink para vehículos eléctricos, se encuentra un proyecto llamado "Electric Vehicle Reference Application" [68], que sirvió de base para comenzar a trabajar e implementar el software deseado.

En esta sección se describirá el modelo realizado en la herramienta Simulink de Matlab, el cual permite simular distintos ciclos de conducción del vehículo eléctrico, así como cargas y descargas de la batería del mismo contra la red o el hogar del usuario.

Durante la carga, descarga, o conducción del vehículo, resulta de interés analizar ciertos parámetros de la batería, tales como el estado de carga (SOC) y la energía consumida. La herramienta generada permite además relevar variedad de valores adicionales como son la velocidad del vehículo, del motor, el torque, la potencia y la corriente instantáneas entregadas por la batería, el kilometraje que se ha recorrido, entre otros datos que pueden ser de interés para el usuario. Capítulo 8. Modelo realizado en Simulink

8.1. Descripción general de los bloques

El modelo se organiza en siete bloques generales que se pueden observar en la figura 8.1. Los parámetros y curvas utilizadas en el mismo deben ser cargados desde el workspace de Matlab, y para esto fueron generados diversos scripts. A continuación se mencionan los bloques principales.

- Gestor Ciclo de Conducción
- Entorno
- Conductor
- Controlador
- V2G/G2V
- Vehículo de pasajeros
- Visualización



Figura 8.1: Modelo completo del vehículo eléctrico realizado en Simulink.

A continuación realiza una breve introducción a la función de cada bloque. Una explicación más detallada se encuentra en los puntos 8.2 al 8.7.3.

Gestor - Ciclo de Conducción: Contiene el ciclo de conducción que se desea simular. Permite ingresar el mismo desde el workspace de Matlab.

Entorno: Importa desde el workspace los datos del entorno en donde se moverá el vehículo, tales como la temperatura ambiente (K), la presión atmosférica (Pa), el vector con los ángulos de inclinación del terreno (grados) y la velocidad del viento(m/s).

Conductor: Simula los pedales del conductor para acelerar o desacelerar. Utiliza la velocidad de referencia (en base al ciclo de conducción), y la velocidad lineal a la que se está desplazando el vehículo (velocidad de realimentación).

Controlador: Implementa un módulo de control del tren motriz, con un sistema de alimentación en base a la batería del vehículo eléctrico.

Calcula el torque a solicitarle al motor en base a los parámetros que entrega el bloque Conductor (aceleración y desaceleración), la velocidad de realimentación en m/s, la velocidad del motor en rad/s, y parámetros de la batería tales como estado de carga, potencia y corriente.

El controlador también asegura que el torque del motor no exceda sus limitantes, ni las de la batería. Considera la capacidad de carga y descarga de la batería, según el estado de carga.

V2G/G2V: Implementa el sistema de carga (G2V) y descarga (V2G) de la batería contra la red o el hogar. Para el V2G se implementa una descarga a potencia constante. Para la carga se implementan cuatro etapas según el nivel de carga de la batería (SOC).

Vehículo de pasajeros: Contiene el modelo del motor utilizado en el vehículo eléctrico, y también el modelo de la batería. A su vez, el bloque modela todo el sistema de transmisión del vehículo, incluyendo engranajes, diferencial, ejes rotacionales y el modelado de las ruedas.

Visualización: Se escogen y se muestran de forma gráfica las magnitudes de mayor interés.

8.2. Gestor - Ciclo de Conducción

El bloque permite ingresar desde el workspace de Matlab una tabla de dos columnas. En la primer columna se carga el vector de tiempo, que debe contener muestras equiespaciadas. En la segunda columna se carga el perfil de velocidad en función del tiempo. El tiempo debe ser cargado en segundos y la velocidad en metros por segundo.

Pueden ser utilizados distintos tipos de ciclos de conducción, incluyendo ciclos estandarizados y ciclos nacionales o de elaboración propia. Dentro del bloque puede seleccionarse la opción de cargar los datos del ciclo a simular desde el workspace, o de un listado pre-definido (que incluye varios de los ciclos más reconocidos internacionalmente).

Para ser cargados desde el workspace, se implementaron, aparte de los reconocidos Ciclos WLTP y NEDC, cinco ciclos de conducción de elaboración dentro de la ciudad de Montevideo, y uno adicional que los agrupa a todos, el Ciclo completo Montevideo (ver capítulo 6). El proceso detallado de la elaboración de estos Ciclos se detalla en el capítulo 10.2 del presente trabajo. Capítulo 8. Modelo realizado en Simulink

8.3. Entorno

En el bloque "Entorno" se ingresan desde el workspace datos relacionados con el medio en que se encuentra el vehículo. El bloque no realiza operaciones, genera un bus con todos los datos que ingresan y son relativos al ambiente y el entorno.

En la imagen 8.2 se observan los parámetros que ingresan desde este bloque. La temperatura ambiente $(T_ambiente)$, presión atmosférica $(Presion_atm)$, ángulo de inclinación del trayecto con respecto a la horizontal (Alpha), velocidad del viento (Vw en el eje de desplazamiento del vehículo), la constante de gravedad (g) y la densidad del aire (Rho). Todos los datos mencionados salen en el bus llamado "Datos del ambiente".



Figura 8.2: Bloque Entorno

8.4. Conductor

8.4. Conductor

El bloque de la figura 8.3 determina cuanto debe acelerar o desacelerar el conductor, en función de la diferencia de velocidad entre la referencia marcada por el Ciclo de Conducción, y la velocidad lineal de realimentación del vehículo. Los valores aceleración y desaceleración están comprendidos entre cero y uno, ya que corresponde a lo que se debe presionar/soltar los pedales al conducir el vehículo, siendo un 1 el pedal a fondo y un cero el pedal libre.



Figura 8.3: Interior del bloque Conductor.

A continuación se analiza como se implementa el controlador que tiene en el interior el bloque.

8.4.1. Bloque conductor - Controlador

La figura 8.4 muestra el interior del "Bloque Conductor", que implementa el sistema de control que determina las salidas.



Figura 8.4: Controlador que determina la aceleración y la desaceleración

Capítulo 8. Modelo realizado en Simulink

El bloque establece un sistema de control con un bloque Proporcional - Integral (PI) junto con constantes anti-windup (Kaw), velocity feed-forward (Kff), grade feed-forward (Kg) y la velocidad nominal (vnom) del vehículo.

A continuación se explica la función de cada constante en el controlador:

• *Kff* (constante de velocidad feed forward): La constante de velocidad feed forward es utilizada para tener una respuesta mas rápida en la velocidad del vehículo cuando aumenta la velocidad de referencia del mismo. Anticipa (va por delante) el valor objetivo deseado. Esto ayuda a mejorar el tiempo de respuesta del controlador en las transiciones de velocidad positivas (cuando se acelera), ya que en los estados estacionarios, el bloque integrador va a compensar la salida generada por la constante de velocidad feed forward.

Por otro lado, la constante Kff, al estar multiplicada por la velocidad de referencia (dada por el Ciclo de Conducción), sin realimentación, tiene un mayor efecto con velocidades de referencias elevadas (lo cuál es deseable) y su efecto es menor cuando la velocidad de referencia es más baja (en dicho caso la salida del controlador es compensada por el integrador).

- *Kaw* (constante anti-windup): Hay casos en donde el valor real de una magnitud de cierto elemento tiene límites, por ejemplo la velocidad máxima de un vehículo. En dichos casos, cuando se llega al límite real, el error de la señal puede ser mayor a cero, por lo cuál, el integrador va a seguir integrando el error, y el mismo va a ir creciendo cada vez más, hasta llegar a un valor considerablemente alto. Esto se denomina el efecto windup, el cuál no es deseado. Para ello, se pone una constante Kaw para minimizar el integrando del integrador, como se observa en al figura 8.4, y así evitar el efecto windup.
- Kg (constante Grade feed-forward): Esta constante ayuda a que el controlador responda mas rápido en trayectos donde la pendiente del recorrido comienza a tener un valor relativamente alto.
- *Kp* (constante proporcional): Constante proporcional tradicional, que implementa una acción de control proporcional al error utilizando únicamente la información del presente.
- *Ki* (constante integradora): Ésta constante de control es la encargada de tomar toda la información pasada del error, e integrarla en el tiempo.
- *vnom* (velocidad nominal del vehículo): Ésta constante se utiliza para mejorar la velocidad de respuesta del Conductor, en base a la velocidad media del recorrido.

Todas las constantes del controlador se ajustan con criterio para que el modelo del vehículo eléctrico responda adecuadamente.

Todos los vehículos tienen una respuesta distinta ante la intención de acelerar. Se ajustaron los parámetros para la Kangoo según el ensayo realizado y descripto en el capítulo 10. Los vehículos restantes se ajustan según la autonomía declarada por los fabricantes utilizando los Ciclos de Conducción que argumentan haber utilizado para medirla.

8.5. Controlador

La función principal de este bloque es determinar el torque que se le debe solicitar al motor, así como el comando del pedal de freno.

El "Controlador" consta de dos bloques principales, que se pueden observar en la figura 8.5 bajo los nombres "Cálculo del torque" y "Gestión de control".



Figura 8.5: Bloque Controlador

El bloque "Cálculo del torque" fue implementado para determinar, a partir de las condiciones impuestas por el ambiente, las características propias del vehículo, la velocidad de realimentación (feedback) y la aceleración que proporciona el "Conductor", el valor de torque tal cuál se describe en las ecuaciones 7.21 y 7.22 obtenidas en el numeral 7.1.

Se calcula un torque de frenado (dentro del bloque "Torque Freno") y un torque de aceleración positiva (bloque "Torque Planta"). Ambos bloques calculan el torque siguiendo los lineamientos del capítulo 7.1, la única diferencia es que el

Capítulo 8. Modelo realizado en Simulink

"Torque Planta" utiliza el comando de aceleración y el "Torque Freno" un comando de desaceleración.

La implementación para el cálculo del bloque "Torque Planta" puede verse en la figura 8.6.



Figura 8.6: Bloque"Torque Planta".

El bloque llamado "Gestión de control" es el que contiene la inteligencia del controlador. Se utiliza para determinar, en función de la solicitud de torque (hallada en "Cálculo del Torque") y las limitaciones del sistema (por ejemplo la potencia máxima del motor, torque máximo entre otras), el torque final. Los bloques "Entradas del Módulo de Control" y "Salidas del Módulo de Control", tienen la función de desglosar y comprimir los buses de entradas y salidas respectivamente.

En la figura 8.7 se muestra su interior, que se divide en dos grupos de sub bloques, el superior (en fondo celeste), selecciona el torque consigna del motor, determina la potencia que se debería solicitar y el valor del frenado. El bloque inferior (en color gris), llamado "Manejo de potencia, limitaciones y cálculo del torque a requerir", se encarga de calcular, a partir de las condiciones energéticas actuales del vehículo (consumo en potencia, pérdidas, potencia de servicios auxiliares, capacidad de la batería, etc), la consigna de torque que efectivamente se debe requerir, considerando las limitaciones del motor.



Figura 8.7: Dentro del bloque Gestión de Control

8.5.1. Sub bloques superiores

Se realiza una descripción de cada uno de los tres bloques superiores según la figura 8.7.

El bloque "Selector aceleración-frenado", diferencia según el signo de la aceleración si el vehículo se encuentra acelerando o frenando, y según esto determina si el torque a la salida de este sub bloque será positivo (Torque Planta) o negativo (Torque Freno) (ver fig. 8.5).

El segundo sub bloque, "Cálculo de potencia eléctrica a solicitar y eficiencia", calcula la potencia que se debería solicitar para cumplir con la consigna de torque a la velocidad a la que está girando el motor. Se utiliza un mapa de eficiencia tabulado y también devuelve el valor de la misma (en función del torque requerido y las *rpm* del motor).

El tercer sub bloque, "Comando del freno forzado", cuya entrada es "Brake" tiene como salida un comando de freno que será utilizado en el bloque principal "Vehículo de pasajeros".

Capítulo 8. Modelo realizado en Simulink

8.5.2. Sub bloques inferiores

Hay dos sub bloques inferiores (ver figura 8.7), el primero de esos sub bloques llamado "Creación de bus de entrada -Curvas de carga y descarga de la bateria (vs SOC)", determina los parámetros que utilizará el segundo sub bloque "Calculo de la consigna de torque a solicitar según potencia disponible", y los concentra en un bus de datos llamado Pwr_Mng_Bus.

El bus Pwr_Mng_Bus (bus de manejo de potencia) está formado por la potencia solicitada (determinada en el conjunto superior de bloques), la potencia de pérdidas en la resistencia interna de la batería, una potencia de servicios auxiliares y un buffer de reserva. El bloque contiene las tablas de limitación de potencia de carga y descarga de la batería según el estado de carga (Potencia de carga y de descarga vs SOC), que determinan cuanta potencia puedo inyectar o extraer para cada valor del SOC.



Figura 8.8: Sub bloque "Cálculo de la consigna de torque a solicitar según la potencia disponible"

El interior del bloque "Cálculo de la consigna de torque a solicitar según potencia disponible" se muestra en la figura 8.8, que se incluye para facilitar la explicación del mismo.

Dicho bloque implementa un selector que distingue entre carga o descarga y a su vez analiza si la batería puede entregar (o consumir) toda la potencia que se desea o se debe limitar la misma (y de este modo el torque), considerando la potencia de pérdidas en la batería, la potencia de los servicios auxiliares y un margen de potencia que se debe dejar disponible para mejorar la respuesta de la batería. En caso que la potencia sea suficiente, el bloque solicita el torque que estaba establecido, en caso contrario se realiza un cálculo dentro de los sub bloques "(\pm) Torque a requerir (posible)". En la figura 8.9 se puede observar como se determina el máximo torque permitido en caso de no poder entregar toda la potencia solicitada. Cabe destacar que se deja un margen de potencia en la batería reservado para mejorar la respuesta de la misma en instantes posteriores.

8.6. Carga y descarga contra la red (V2G/G2V)



Figura 8.9: Sub bloque "(+) Torque a requerir (posible)"

8.6. Carga y descarga contra la red (V2G/G2V)

El bloque realiza el cálculo de la corriente de carga y descarga de la batería del vehículo. La carga se implementa en cuatro etapas considerando el estado de carga (SOC) y la tensión de la batería. La descarga se realiza a una consigna de potencia constante. A continuación se profundiza sobre el funcionamiento del bloque V2G de la figura 8.1 cuyo interior puede observarse en la figura 8.10.



Figura 8.10: Bloque V2G/G2V

8.6.1. Bloques de entradas desde el workspace

Los bloques "Variables a utilizar para V2G (del workspace)" y "Variables a utilizar para G2V (del workspace)" (ver figura 8.10) importan desde el workspace de Matlab los parámetros que determinarán las características de la carga o descarga y los concentra en dos buses de datos (los bloques no realizan ninguna operación).

Si bien todas las variables importadas se utilizan, algunas de ellas no se utilizan directamente desde los bloques mencionados, pero se consideró prudente incluirlas

Capítulo 8. Modelo realizado en Simulink

para que el usuario, a la hora de querer cambiar algún parámetro, conozca que variables se manejan desde el workspace.

8.6.2. Bloque V2G/G2V_Crnt

Dentro del bloque "V2G/G2V_Crnt" se implementa la lógica y la operatoria que determinan las corrientes de carga y de descarga. El diagrama interno de V2G/G2V_Crnt se visualiza en la figura 8.11. Contiene dos bloques principales, uno que "Calcula la corriente del V2G a una consigna de potencia fija", y otro que realiza el "Cálculo de la corriente a entregar a la batería (G2V)". Entonces, los mismos calculan las corrientes de descarga y de carga (respectivamente) a solicitar o entregar a la batería. La salida del bloque "V2G/G2V_Crnt" son las mencionadas corrientes calculadas por los bloques principales en forma de bus de datos.



Figura 8.11: Bloque V2G/G2V_Crnt

8.6.2.1. Descarga contra la Red (V2G)

Desde el bloque que "Calcula la corriente del V2G a una consigna de potencia fija" (ver figura 8.11), se optó por implementar una descarga a potencia constante hacia la red o el hogar. Se limita la potencia máxima a entregar (en kW), y también el estado de carga (SOC) al que se permite extraer energía de la batería para no trabajar con descargas demasiado profundas. Ambas limitantes (SOC y potencia) pueden ser modificadas desde el workspace.

Para mantener la consigna de potencia fija, el bloque calcula el cociente entre la consigna y la tensión de la batería (se realimenta actualizando el valor) para calcular la corriente a entregar. En caso que el nivel del SOC sea menor o igual al valor límite establecido, la corriente se fija en valor nulo. En caso que la consigna de potencia supere el valor límite establecido, se le solicitará a la batería el valor de potencia máximo pre establecido. La lógica implementada se muestra en la figura 8.12.

8.6. Carga y descarga contra la red (V2G/G2V)



Figura 8.12: Bloque cálculo de corriente V2G

8.6.2.2. Carga de la batería (G2V)

El bloque "Cálculo de la corriente a entregar a la batería (G2V)" (ver figura 8.11) realiza el cálculo de la corriente de carga que debe suministrar el circuito alimentador a la batería del vehículo eléctrico. Se implementa un sistema de cuatro etapas de carga (como se describe en la sección 4.4.5). El modo de carga al que se decide alimentar la batería en cada instante depende de la realimentación de los parámetros de la batería (SOC y tensión en bornes).



Figura 8.13: Etapas de Carga en baterías de litio [69]

A continuación se describen las etapas implementadas:

• Corriente constante: Cuando la batería se encuentra cargada en menos de un valor umbral del SOC (el valor predeterminado es del 80%), se implementa una carga a corriente constante. Se considera un valor de potencia máxima de la que se dispone para cargar el vehículo y la tensión de vacío máxima que alcanzará la batería en esta etapa de carga (esta tensión se

Capítulo 8. Modelo realizado en Simulink

carga desde el workspace). Con este cociente se obtiene la corriente más alta de forma de no superar la potencia máxima disponible al mayor valor de tensión en la batería. Al considerar la tensión de vacío se está despreciando la potencia disipada en la resistencia interna de la batería para este cálculo. De haber considerado un valor de tensión de vacío menor (a un SOC inferior al umbral), la potencia tomada de la red sería mayor que el valor de consigna definido. Si la tensión considerada hubiese sido mayor a la que corresponde al valor umbral, no se estaría aprovechando toda la potencia.

Esta etapa será la de carga más rápida. Dependerá del valor de potencia disponible en el Sistema de Alimentación del Vehículo Eléctrico (SAVE) y del DOD que tenga la batería, el tiempo en que demore en cargar la batería.

- Tensión constante: Luego de la etapa de corriente constante (pasado el 80% del SOC), se implementa una etapa a tensión constante, de forma tal que la corriente vaya disminuyendo a medida que la carga se acerca a su máximo. Se fija el valor inicial de la corriente al valor que traía la misma en la carga a corriente constante. Al finalizar esta etapa, la corriente deberá ser igual a un umbral definido para el cual se pasará a la siguiente etapa. La tensión de carga deberá entonces elegirse de forma de cumplir con estos requerimientos.
- Ecualización (corriente constante): Cuando la corriente disminuye (a medida que se carga la batería) a un determinado porcentaje de la capacidad nominal (en Ah), se mantiene esta corriente constante un lapso para ecualizar la carga en las celdas de la batería.
- Ecualización (tensión constante): Para finalizar la ecualización se vuelve a una etapa de tensión constante hasta lograr la plenitud de la carga. La corriente inicial deberá ser menor o igual a la de la etapa de "Ecualización (corriente constante)".
- Etapa de flotación: Una vez cargada la batería, si la misma sigue conectada al cargador, se controlará el SOC para que se mantenga al menos al 99.99%. En caso de bajar de ese umbral, se inyecta una corriente de 0.1 A hasta volver a estar a pleno para compensar el fenómeno de la auto-descarga.



En la figura 8.14 puede observarse la implementación del bloque de cálculo de corriente de carga.

Figura 8.14: Bloque cálculo de corriente G2V

8.7. Vehículo de Pasajeros

El bloque implementa el motor, la batería, el sistema de transmisiones, ejes y componentes que entregan la energía a las ruedas del vehículo. Incluye también un gestor encargado de decidir en base a tiempos y parámetros internos, cuándo se solicita energía para movilidad eléctrica, cuándo para descarga a la red o cuándo se le entrega carga a la batería.

En una vista genérica, el "Vehículo de Pasajeros", cuyo interior se observa en la figura 8.15, consta de dos bloques principales que se encargan de distintos aspectos. El bloque "Planta eléctrica (motor - batería)" se encarga de modelar el motor y la batería del vehículo eléctrico, se detallará en la sección 8.7.1. El bloque "Tren de Conducción" se encarga del modelo del movimiento del vehículo, su implementación se detalla en la sección 8.7.2.



Figura 8.15: Bloque "Vehículo de Pasajeros"

A continuación se describen en detalle ambos bloques.
8.7.1. Planta eléctrica (motor - batería)

Las entradas son el torque que se le solicitará al motor en caso de realizar un ciclo de conducción, la velocidad del motor, la temperatura ambiente y/o las consignas de corriente de V2G o G2V que se le podrían solicitar o entregar a la batería. Luego de procesar las entradas, el bloque devuelve como salidas la tensión en bornes de la batería, la corriente que entrega, la potencia, la energía consumida y SOC, así también como el torque entregado en el rotor del motor y la corriente necesaria para obtenerlo.

El bloque contiene dos sub bloques diferenciados, tal como se muestra en la figura 8.16, estos bloques son "Motor" y "Batería".



Figura 8.16: Bloque Planta eléctrica (motor - batería)

Entre estos dos bloques se da un intercambio de información, en donde al motor le ingresan valores de tensión en bornes de la batería, de torque solicitado, la velocidad del motor y el SOC.

El bloque batería tiene como entradas la corriente solicitada por el motor, las consignas de corriente del V2G y G2V, un reloj y la temperatura de la batería. Las salidas son el SOC, la tensión en bornes de la batería, la corriente entregada por la misma, la energía consumida, la potencia instantánea, la potencia de pérdidas en la resistencia interna y la tensión en bornes de dicha resistencia.

8.7.1.1. Bloque Motor

Dado que el motor es uno de los principales componentes del vehículo eléctrico, anteriormente se ha destinado la sección 7.2 para desarrollar acerca de las principales consideraciones para el modelado del motor. Dichas consideraciones son implementadas en Simulink, dentro del bloque "Motor", como se indica a continuación.

Capítulo 8. Modelo realizado en Simulink

Observando el bloque "Motor", se tienen cuatro bloques (ver figura 8.17) que realizan operaciones para determinar las salidas principales.



Figura 8.17: Bloque Motor

Los bloques dentro de "Motor" se observan en la figura 8.17, y son:

Cálculo del torque según requerimiento, velocidad y potencia máxima: Las entradas al bloque son el torque que se le quiere solicitar al motor y la velocidad que trae el mismo.

Internamente el bloque adquiere desde el workspace los valores de la potencia máxima y el torque máximo para el vehículo eléctrico. A partir de esto, se limita el valor de torque (de ser necesario) contemplando los puntos de curvas típicas de par - velocidad, potencia - velocidad, como las que pueden verse en la figura 8.18 (ver desarrollo en sección 7.2). Finalmente, la salida es el torque que entrega efectivamente el motor.

240

220





Torque en función de rpm del motor

Modelado Renault Kangoo ZE 22kWh

Figura 8.18: Curvas Potencia - Torque en función de la velocidad para la Renault Kango ZE.

Figura 8.19: Limitante del torque utilizado en la simulación para la Renault Kangoo ZE

- Limitador de torque en SOC: en caso de que el valor del SOC sea menor a un 0.2 %, se fuerza a cero el valor de torque a requerir.
- Potencia mecánica y de pérdidas (mapa de eficiencia): a partir del par y de la velocidad devuelve la potencia mecánica y la potencia de pérdidas en el motor. La potencia de pérdidas es calculada a partir de un mapa de eficiencia el cual determina a partir de la entrada de torque y velocidad la eficiencia del motor en ese punto, con el valor de eficiencia (η) se aplica la ecuación $P_{perdidas} = P_{mec} \cdot (1/\eta 1)$ (una descripción más profunda se realiza en la sección 7.2).
- **Corriente eléctrica:** para el cálculo de la corriente se utilizan la potencia mecánica, las pérdidas y la tensión en bornes de la batería. El cociente entre la suma de las potencias y la tensión resulta la corriente necesaria que debe entregar la batería.

Finalmente, las salidas del bloque que se indica en la figura 8.17 son:

- **Corriente_motor:** Corriente a solicitar a la batería para obtener la potencia deseada para impulsar el vehículo.
- **Torque_motor:** Torque entregado por el motor que impulsa al vehículo eléctrico.

8.7.1.2. Bloque Batería

El modelado de la batería es de gran importancia para el presente proyecto ya que a partir del mismo se analizarán diferentes comportamientos. Debido a esto se ha destinado la sección 7.3 para detallar acerca de las principales variables a tener en cuenta, así también como las distintas contemplaciones para el correcto modelado de la batería.

En la figura 8.16 se pueden apreciar como se relacionan las entradas y salidas del bloque "Batería", mientras que en la figura 8.20 se puede apreciar que dicho bloque está a su vez compuesto de dos sub bloques principales; "Gestor de corriente demandada" y "Batería Mapeada".

Sus entradas son las corrientes a solicitar al motor (Corriente_motor), a entregar a la red (V2G_Crnt) y a entregar a la batería (G2V_Crnt) para cargarla. También un reloj (Clk) y la temperatura de la batería. Las salidas son el SOC, la corriente extraída (Corriente_bat), la tensión en bornes (Tensión_bat), la energía consumida (Energía_Consumida), la potencia instantánea (Potencia_Bat_kW), la tensión de vacío de la batería (Tensión_Vacio), la tensión en bornes de la resistencia interna de la batería (Tensión_Rint) y la potencia de pérdidas disipada por la resistencia interna (Perdida_Rint_kW).





Figura 8.20: Bloque Batería

Gestor de corriente demandada

El "Gestor de corriente demandada" (ver figura 8.21) decide cuando cargar o descargar la batería o cuando utilizarla para movilidad, en función de variables de tiempo definidas con este propósito. También se encarga de implementar el fenómeno de autodescarga, sumando a cualquiera de las corrientes determinadas una corriente de autodescarga pre-calculada y cargada en el workspace. La misma se calcula en base a una descarga del 8% de la capacidad máxima mensual (ver sección 7.3 por mayor detalle).

A la salida se obtiene entonces la consigna de corriente que deberá entregar o consumir la batería.



Figura 8.21: Bloque "Gestor de corriente demandada"

Para definir la acción que se desee simular (carga, descarga, o movilidad eléctrica), se deben cargar constantes de tiempo pre-definidas desde el workspace. Los nombres y las funciones de las constantes de tiempo (ver bloques en figura 8.21) se explican a continuación:

8.7. Vehículo de Pasajeros

- Ciclo_Cond_time: marca el tiempo en que finaliza el ciclo de conducción. En caso de tener valor cero, entonces no se simulará ningún ciclo de conducción (usualmente se cargará el valor cero cuando sólo se quiera cargar o descargar la batería contra la Red). De ser infinito, sólo se utilizará la batería para impulsar el vehículo (nunca se cargará o descargará la batería contra la Red).
- V2G_time: marca el tiempo donde se comienza a descargar la batería contra la Red o el hogar. Para que comience la descarga, Ciclo_Cond_time debe ser menor que V2G_time y el tiempo de simulación (determinado con el reloj) debe superar el valor determinado por V2G_time. Si se quisiera comenzar a descargar la batería hacia la red desde el momento cero, el V2G_time deberá ser cero. Si no se estima que se realizará una descarga hacia la red, será infinito.
- **V2G_end_time:** marca el fin de la descarga contra la red o el hogar.
- Charge_time: Marca el tiempo donde se empieza a cargar la batería. Charge_time debe ser mayor que Ciclo_Cond_time para cargar la batería (similar a V2G_time).

De esta forma, definiendo correctamente los tiempos, se pueden lograr simulaciones que incluyan tanto ciclos de conducción con el vehículo, como descargas contra la red y cargas desde la misma.

Capítulo 8. Modelo realizado en Simulink

Batería Mapeada

El bloque "Batería Mapeada" tiene como entradas la temperatura ambiente, que proviene del bloque "Entorno" y la corriente por la batería, entregada por "Gestor de corriente demandada" visto anteriormente. Como salidas se tienen el estado de carga (SOC), la corriente entregada, la tensión en bornes de la batería, la energía consumida y la potencia instantánea.

El bloque "Batería Mapeada" está compuesto por tres sub-bloques. El primero que realiza el "Cálculo de la energía consumida", otro que a partir de la misma efectúa el "Cálculo del SOC", y el tercero que se encarga del "Cálculo de tensión en bornes de la batería". Un mayor detalle de los procedimientos que se realizan dentro de cada bloque se ha desarrollado anteriormente en la sección 7.3.

Las variables de entrada y salida de estos sub bloques están interrelacionadas, como se puede observar en la figura 8.22, que muestra el interior del bloque "Batería Mapeada".



Figura 8.22: Bloque "Batería Mapeada"

Los bloques utilizan parámetros que deben ser cargados desde el workspace, como son: el estado de carga (SOC) inicial, la energía nominal de la batería y el número de celdas en serie y paralelo que la conforman. Estos parámetros se utilizan para caracterizar la batería y ejecutar los cálculos necesarios.

El bloque "Cálculo de tensión en bornes de la batería", que se muestra en la figura 8.23, se utiliza para calcular la tensión en bornes de la batería. Se deben importar desde el workspace las curvas OCV = f(SOC) y $R_{int} = f(SOC, T)$, que corresponden a una celda de la batería, tal como se describió en la sección 7.3. Considerando el número de celdas en paralelo (N_p) y en serie (N_s) que posee el paquete de baterías es que finalmente se obtiene la tensión en bornes de la batería.

8.7. Vehículo de Pasajeros



Figura 8.23: Calculo de tensión V_{batt}.

El bloque "Cálculo de energía consumida" realiza el producto entre la corriente demandada y la tensión en bornes de la batería para calcular la potencia entregada. Se calcula también la potencia disipada por la resistencia interna de la batería. También se considera el efecto de utilizar servicios auxiliares del vehículo (por ej. aire acondicionado). Luego de sumar estas potencias, se realiza la integral determinando la energía total consumida o disipada. La implementación del bloque se explicita en la figura 8.24.



Figura 8.24: Bloque "Cálculo de energía consumida".

Con el cálculo de la energía consumida realizado, el valor del estado de carga inicial (SOC inicial) y la energía total que puede almacenar la batería, se determina el estado de carga (SOC) con la siguiente ecuación:

$$SOC \% = \left(\frac{SOC_inicial}{100} - \frac{Energia_Consumida}{Energia_Total}\right) \cdot 100$$
(8.1)

Donde el valor del $SOC_{inicial}$ debe estar en porcentaje, la Energía_Consumida y la Energía_Total deben estar en las mismas unidades. Energía_Total será la energía máxima que es capaz de almacenar la batería.





Figura 8.25: Bloque "Cálculo del SOC".

Por lo tanto, el bloque "Cálculo del SOC" implementa la ecuación 8.1. También limita el SOC mínimo a un 0.2%, requisito necesario para el correcto funcionamiento del modelo.

8.7.2. Tren de conducción (DrivetrainEV)

El último bloque relevante que se observa en la figura 8.16 es el bloque llamado "Tren de conducción" (o drivetrain).

Cabe aclarar que la implementación del bloque "Tren de conducción" está basado en una implementación ya realizada por Simulink, dentro de la aplicación "Electric Vehicle Reference Application" [68]. Se decidió implementarlo de forma similar ya que excedía los objetivos planteados para el presente proyecto. A partir de lo anterior, se ajustaron varios parámetros para que el bloque "Tren de conducción" refleje fielmente el vehículo eléctrico a simular.

A modo general, el bloque drivetrain (ver figura 8.26) obtiene la velocidad real de traslación del vehículo y las rpm del motor. Para ello es necesario ingresar los datos del ambiente, los cuales son el ángulo α del recorrido y la velocidad del viento. También se necesita ingresar el requerimiento de frenado de las pastillas de disco del vehículo, el torque que se desea realizar en el motor y el estado de carga actual.



Figura 8.26: Bloque de entradas y salidas del bloque tren de conducción.

Capítulo 8. Modelo realizado en Simulink

8.7.2.1. Bloque Drivetrain

En la figura 8.27, se muestra una vista general del bloque drivetrain. Se procederá a analizar dicho bloque en dos partes.



Figura 8.27: Vista general del bloque del tren de conducción del vehículo.

La primera parte consta de los ejes del vehículo eléctrico, los cuales son el DriveShaft, Axle, diferencial y transmisión. A modo esquemático se presentan dichos parámetros en la figura 8.28.



Figura 8.28: Ejes rotativos del vehículo a simular [70].

En la primera parte del bloque, se muestran las partes que simulan el diferencial del vehículo, el eje transversal Axle, y el eje longitudinal Drive Shaft.

En la figura 8.29 se muestra el modelado en Simulink.



Figura 8.29: Bloques utilizados en Simulink de ejes rotatorios del vehículo.

Dicho modelo, implementa fuerzas de rozamiento y viscosidades en los ejes. La salida del bloque "Axle Compliance", es parte de la entrada del bloque "Wheels and Brakes".

La segunda parte del análisis del drivetrain, corresponde a los bloques "Wheels and Brakes", "Vehicle" y "Vehicle Output Interface". Se observan las interacciones entre dichos bloques en la figura 8.30.



Figura 8.30: Bloques utilizados en Simulink para obtener la velocidad lineal y las revoluciones del motor.

El bloque "Wheels and Brakes" modela las fuerzas que actúan sobre las ruedas del vehículo según cuanto se este presionando el pedal del freno (actúan los discos de freno), y el torque en las ruedas, como se observa en la figura 8.31.

Capítulo 8. Modelo realizado en Simulink



Figura 8.31: Modelado del bloque "Wheels and Brakes".

La salida del bloque "Wheels and Brakes" se concatena con el bloque "Vehicle", el cuál mediante la fuerza ejercida en las ruedas en el eje X y Z, la velocidad del viento y el ángulo de inclinación α del trayecto, obtiene en la salida la velocidad lineal del vehículo.



Figura 8.32: Modelado del bloque "Vehicle".

Con la velocidad Lineal del vehículo, dividiendo entre el radio de la rueda (incluyendo cubierta) y multiplicando por el diferencial y la transmisión, se obtiene

la velocidad angular en el motor, como muestra la imagen 8.33 (en este caso el diferencial tiene valor 1).



Figura 8.33: Velocidad angular del motor en función de la velocidad lineal del vehículo.

Finalmente, las salidas son la velocidad del vehículo y las revoluciones del motor (en rpm).

Capítulo 8. Modelo realizado en Simulink

8.7.3. Visualización

En este bloque se muestran las magnitudes que se consideran de mayor relevancia. Las visualizaciones serán accesibles desde la interfaz gráfica (ver capítulo 9) con el fin que los usuarios puedan decidir que variable desean observar.

Se deciden observar las siguientes variables: Velocidad del vehículo (km/h), Velocidad del motor (rpm), Torque del motor (Nm), SOC (%), Corriente por la batería (A), Potencia en la batería (kW), Tensión en la batería (V) y Energía Consumida (kWh).

En la figura 8.34 pueden observarse las magnitudes anteriormente nombradas. A su vez se exportan hacia el workspace las variables a las que se desea tener acceso para su análisis.



Figura 8.34: Bloque Visualización

Capítulo 9 Interfaz Gráfica

Habiendo implementado el modelo en Matlab - Simulink, se consideró prudente realizar una interfaz que permitiese realizar simulaciones y acceder a datos contenidos en el modelo de forma práctica y sencilla.

En el presente capítulo se desarrolla la explicación y un breve manual de uso para al lector acerca de la interfaz gráfica realizada.

La interfaz es una herramienta generada para facilitar el uso de la herramienta de modelado desarrollada a usuarios externos al proyecto. A través de la misma se podrán realizar simulaciones de recorridos en vehículos eléctricos, cargas desde la red o descargas hacia la red o el hogar. Se podrán visualizar comparaciones de los vehículos y de los recorridos implementados. Permite efectuar modificaciones a los parámetros de interés como la energía máxima de la batería, la potencia del motor, el estado de carga o de salud inicial, entre muchas otras variables que se describirán a continuación. Capítulo 9. Interfaz Gráfica

9.1. Manual de usuario

Para dar inicio al programa, se debe abrir y luego ejecutar desde Matlab, el archivo .m nombrado GULBeV2G.m .



Figura 9.1: Interfaz de bienvenida

El programa inicia con la interfaz gráfica de bienvenida como se observa en la figura 9.1.

A continuación se comentan los 3 botones de la pantalla de bienvenida.

- Salir: finaliza el programa.
- Info: contiene información sobre los autores.
- Iniciar: Botón que da comienzo al programa.

Al hacer clic en el botón **Iniciar** se abre la interfaz principal.

GUI_Hito_2 **— — —** ar Progra Ciclos de Conducción Vehículo Eléctrico Interacción con la red Seleccione Ciclo de cond Seleccione vehículo 👻 Descarga hacia la red Distancia recorrido (km) BeV2G Visualización : Unir ciclos de conducción Encender aire acondicionado Seleccione el gráfico que desea ver • 🔘 Si) Si O No No Cerrar visualizacio Continuar Pausa Reset Stop

9.1. Manual de usuario

Figura 9.2: Interfaz principal

La figura 9.2 es la pantalla principal de ejecución del programa. Desde aquí se comandará la mayor parte del ejecutable.

El programa puede simular tres tipos diferentes de uso del VE.

- 1. Simular ciclo/s de conducción seleccionado/s para un VE.
- 2. Simular una carga del VE desde la red de distribución (G2V).
- 3. Simular una descarga desde el VE hacia la red de distribución u hogar (V2G).

A continuación se describe como simular un ciclo de conducción.

Capítulo 9. Interfaz Gráfica

9.1.1. Simular ciclo de conducción



Figura 9.3: Seleccionar ciclo de conducción

Como muestra la imagen 9.3, lo primero que se debe hacer es seleccionar un ciclo de conducción. La opción 12 deja utilizar un ciclo de conducción creado por el usuario si se desea. Para ello debe previamente completar la planilla excel *Ciclo_personalizado_excel.xlsx* con el ciclo personalizado, y luego seleccionar en el menú la opción 12 de "Ciclo personalizado".



Figura 9.4: Ciclo de conducción seleccionado

Luego de haber seleccionado y cargado exitosamente el ciclo, se debe de apreciar un tick en color verde a la derecha del menú de selección, como muestra la figura 9.4. También se visualizará un gráfico con el perfil de velocidades del ciclo y se desplegará el kilometraje del recorrido seleccionado. En este caso se seleccionó "Ciclo Montevideo completo".

El próximo paso es elegir un VE desde el menú de selección.



Figura 9.5: Seleccionar vehículo eléctrico

Como muestra 9.5, haciendo clic en el menú de VE, se despliega una lista con VE disponibles para seleccionar.



Figura 9.6: Vehículo eléctrico seleccionado correctamente

Capítulo 9. Interfaz Gráfica

Al seleccionar y cargar correctamente el VE, se debe mostrar un tick verde a la derecha del menú de selección, como se observa en la imagen 9.6. En este caso se seleccionó la Renault Kangoo ZE.



Figura 9.7: Encender aire acondicionado en el VE

Existe una configuración, en la cuál se puede elegir si el VE desea conducir con el aire acondicionado encendido o apagado. Esto se observa en 9.7.

Antes de comenzar una simulación, se debe elegir si se desea unir los ciclos de conducción o no. Por defecto sale con la opción de "No" unir ciclos.



Figura 9.8: Seleccionar si se desea unir los ciclos de conducción

Esto se utiliza en el caso de que se desee guardar los datos recabados de una simulación anterior para luego utilizarlos en la próxima simulación. Para ello, se debe seleccionar "Si" en el recuadro de unir ciclos de conducción, como se observa en la figura 9.8 (en la imagen se observa que está seleccionada la opción "No"). Por ejemplo, si el VE comienza con la batería cargada al 100 %, y se simula un ciclo de conducción NEDC, al finalizar el ciclo, dependiendo del VE seleccionado, la batería quedará por ejemplo en un 70 % de su carga máxima. Si está seleccionada la casilla "Si" en unir ciclos, en la próxima simulación, el porcentaje de carga de la batería comenzará en un 70 % de su carga máxima (esto por ejemplo es útil para ver la autonomía de un VE con determinado ciclo de conducción).

Si se está uniendo ciclos, al finalizar una simulación, se puede escoger otro ciclo de conducción, por ejemplo se puede realizar una simulación con un ciclo NEDC y luego la segunda simulación con un ciclo WLTP. En cambio, al estar uniendo los ciclos, no se permite cambiar el VE seleccionado. En el caso de hacerlo, se reinicializarán todos los parámetros, como por ejemplo el estado de carga de la batería, energía consumida, etc.

Luego de haber escogido el ciclo de conducción, el VE, y si se desea unir ciclos o no. se puede comenzar con la simulación. Por defecto, la batería de los VE comienza cargada al 100 %. Mas adelante se explicará como cambiar ese valor con el botón "Cambiar parámetros".



Figura 9.9: Comenzar la simulación con ciclos de conducción

Para ejecutar la simulación, se debe hacer clic en el botón Simular Ciclo de Conducción, como muestra la imagen 9.9. En ese momento, el programa comenzará a simular el VE escogido, para el ciclo de conducción seleccionado.



Capítulo 9. Interfaz Gráfica

Figura 9.10: Botones de Continuar, Pausa, Stop y Reset del programa

Como se observa en 9.10, existen 3 botones que se pueden utilizar durante la simulación. Se puede pausar (botón Pausa) la simulación y luego continuarla (botón Continuar), o también se puede forzar que termine la simulación en cualquier instante, con el botón Stop.



Figura 9.11: Observar distancia recorrida, SOC actual remanente, y seleccionar gráfico para ver la simulación en tiempo real

Al pausar la simulación ó al presionar el botón Estado de carga final (%), se actualizan los valores del estado de carga de la batería y los km recorridos,

152

los cuáles se pueden observar arriba en la derecha de la interfaz principal, como se observa en 9.11. Se pueden actualizar también presionando en los botones de **Distancia acumulada (km) y Estado de carga final (%)**.

Además, durante la simulación, se pueden desplegar los gráficos de ciertos parámetros del VE, como se observa en 9.11, tales como el estado de carga (SOC(%)), velocidad del VE, etc.



Figura 9.12: Gráfico del estado de carga (SOC) en tiempo real de la simulación

En la figura 9.12 se observa el gráfico del estado de carga que se seleccionó en 9.11.

Al finalizar de simular un ciclo de conducción tipo, se puede calcular el estado de salud (SOH) de la batería si se repitiera dicho ciclo simulado "n" veces. Con esto, lo que se busca es, por ejemplo, simular un ciclo de conducción normal de ida y vuelta al trabajo, y evaluar el estado de salud de la batería transcurrido cierto tiempo repitiendo dicho ciclo.





Figura 9.13: Botón para calcular el estado de salud de la batería. Valores del estado de carga y distancia recorrida actualizados luego de finalizar la simulación.

En la imagen 9.13 se observa el botón que nos lleva a una nueva interfaz para calcular el estado de salud de la batería.

Además en 9.13 se observa la distancia acumulada y el estado de carga final luego de finalizada la simulación del ciclo de conducción. Para actualizar estos valores se puede hacer clic en el botón Pausa, Stop, o en los botones Distancia acumulada (km) o Estado de carga Final (%) como ya se había mencionado.

Al presionar el botón SOH, en algunos casos el usuario deberá esperar unos segundos hasta que se abra la nueva interfaz, ya que se ejecuta un algoritmo complejo y dependiendo del ciclo de conducción utilizado puede demorar más o menos en cargar.

GUT SOH	
Introduzca la cantidad de ciclos que desea simular	Actualizar
Valor SOH	Resetear SOH
Cantidad de ciclos tal que SOH=80% : 4050	Info

Figura 9.14: Interfaz gráfica para el SOH de la batería.

En la figura 9.14 se muestra la interfaz gráfica para el cálculo del SOH de la batería. En este ejemplo el número 4050 es la cantidad de ciclos que la batería

es capaz de ejecutar de un determinado ciclo de conducción tales que su vida útil llega al 80% (valor en el cuál es considerado que finaliza la vida útil de la batería para un VE).

Además, si el usuario desea probar con un número de ciclos menor ó mayor, está disponible el casillero blanco a la derecha de donde dice "Introduzca la cantidad de ciclos que desea simular". Se debe ingresar un número entero mayor o igual a 0 y dar clic en actualizar.



Figura 9.15: Cantidad de ciclos insertados manualmente en la interfaz para el cálculo del SOH.

En la imagen 9.15 el usuario decidió utilizar 1200 ciclos y presionó el botón Actualizar. El cartel confirma que la cantidad de ciclos fue ingresada con éxito.

GUI_SOH	
Introduzca la cantidad de ciclos que desea simular	Actualizar
Valor SOH 0.935893	Resetear SOH
Cantidad de ciclos tal que SOH=80% : 4050	
	Info

Figura 9.16: Valor del SOH con 1200 ciclos ingresados para un determinado ciclo de conducción.

Al darle clic en "Valor SOH" el programa calcula el SOH para la cantidad de ciclos ingresados. En este ejemplo el SOH vale 0.936 p.u., que equivale a un 93.60% de la capacidad máxima (de la batería a nuevo).

El programa, además de ofrecer la posibilidad de interactuar con ciclos de conducción, brinda la posibilidad de hacer descargas desde el vehículo hacia la red, o cargar el vehículo desde la red. Luego se analizar la vida útil de la batería utilizando dichas cargas y descargas. Capítulo 9. Interfaz Gráfica

9.1.2. Simular descarga desde el vehículo hacia la red

En este caso, el proceso es análogo a cuando se simula un ciclo de conducción, con la diferencia que en vez de cargar un ciclo de conducción, se elije "Descargar hacia la red".



Figura 9.17: Botón para cargar los parámetros para realizar una descarga desde el VE hacia la red.

Al presionar Descarga hacia la red, se cargan los parámetros que se utilizan en la descarga, dependiendo del VE escogido. Se puede modificar la potencia a la que se quiere hacer la descarga desde el botón Cambiar Parámetros, lo cual se explicará posteriormente.

En la figura 9.17 se observa que los datos quedaron cargados con éxito al mostrar el tick verde.

9.1. Manual de usuario



Figura 9.18: Botón para simular una descarga desde el vehículo hacia la red, o una carga desde la red hacia el vehículo.

Para comenzar la simulación se debe hacer clic en el botón Simular V2G como se muestra en la figura 9.18.

9.1.3. Simular carga desde la red

Análogamente a la descarga del vehículo hacia la red, se puede realizar la carga del vehículo desde la red.



Figura 9.19: Botón para cargar los parámetros a utilizar en la carga del VE desde la red.

La figura 9.19 muestra en la interfaz que los datos han sido cargados correctamente para un determinado VE.

Capítulo 9. Interfaz Gráfica

Luego para comenzar la simulación, se debe presionar el botón Simular V2G de la figura 9.18.

9.1.4. Cambiar parámetros del motor, batería, vehículo, ambiente, carga y descarga

Si el usuario desea, puede modificar los parámetros de la simulación. El programa deja modificar parámetros del motor, la batería, el vehículo, ambiente, la descarga hacia la red, ó la carga del VE desde la red.



Figura 9.20: Botón para cambiar parámetros de la simulación.

El botón para cambiar parámetros se observa en la figura 9.20.

9.1. Manual de usuario



Figura 9.21: Interfaz gráfica para cambiar parámetros de la simulación.

Cuando se hace clic en el botón Cambiar Parámetros, se ingresa a la interfaz gráfica que se observa en la figura 9.21.



Figura 9.22: Interfaz gráfica con los valores actuales cargados de la simulación.

Si el usuario desea observar que valores tiene actualmente para la simulación, debe hacer clic en el botón "Valores Actuales", como se observa en la figura 9.22.

Capítulo 9. Interfaz Gráfica



Figura 9.23: Modificar valores actuales para la simulación.

Para modificar el/los valor/es actuales que el usuario desee, debe hacer clic en los casilleros de color blanco, ingresar el parámetro, y darle al botón "Actualizar" a la derecha de cada parámetro que se modifique. La figura 9.23 muestra un ejemplo donde el usuario asigna el valor de 82% al SOC remanente del VE.



Figura 9.24: Cerrar y guardar valores modificados.

Finalmente, para guardar los cambios realizados, se debe de hacer clic en el botón "Cerrar", como se observa en 9.24.

9.1.5. Comparar vehículos eléctricos

El programa cuenta con la funcionalidad de poder comparar diferentes tipos de VE entre sí.



Figura 9.25: Botón para abrir interfaz gráfica para comparar VEs.

Para ingresar en la interfaz de comparar vehículos, se debe de hacer clic en el botón "Comparar vehículos", como se muestra en la imagen 9.25.

GUI_simulaciones_realizadas	
Comparación de Vehiculos	Atrás
Seleccione ciclo de conducción a comparar :	
Seleccionar ciclo 💌	
Seleccione vehíclos a comparar :	
Vehiculo 1 Vehiculo 2	
Seleccionar 💌	-
	_
Ver parámetros Comparar!	
Seleccione parametro :	
Seleccionar 👻	
Vehiculo 1	
SOC Inicial (%):	
SOC Final (%):	
Energía consumida (kW):	
Vehiculo 2	
SOC Inicial (%):	
SOC Final (%):	
Energía consumida	
(kW):	

Figura 9.26: Interfaz gráfica principal para comparar VEs.

Capítulo 9. Interfaz Gráfica

La figura 9.26 muestra la interfaz gráfica principal para comparar diferentes tipos de VEs.

	Compa	aración de V	/ehiculos	Atrás
ie	leccione ciclo de conducci	ión a comparar :		
	Seleccionar ciclo	-		
	1) Ciclo Montevideo completo	:		
ie	2) MILTD Classe 2			

Figura 9.27: Seleccionar ciclo de conducción para comparar vehículos eléctricos.

Lo primero que se debe hacer es seleccionar el ciclo de conducción a utilizar para comparar dos vehículos eléctricos entre sí. La imagen 9.27 muestra los 3 ciclos que se pueden escoger.

GUI_simulaciones_realizadas				
Comparaci	ón de Vehiculos Atrás			
Seleccione ciclo de conducción a comparar :				
1) Ciclo Montevideo completo 🔹 🖌				
· · · · ·				
Seleccione vehíclos a comparar :				
Vehiculo 1	Vehiculo 2			
Seleccionar	Seleccionar 👻			
Seleccionar				
Renault Kangoo				
Renault Zoe	Comparar!			
Nissan Leaf				
BYD E6				
Se Volkswagen E-up!				
Seleccionar				

Figura 9.28: Seleccionar el primer vehículo.

Al cargar un ciclo de conducción debe de aparecer un tick verde como muestra 9.28.

Luego se debe elegir el vehículo 1 como se muestra en 9.28.

162

9.1. Manual de usuario

GUI_simulaciones_realizadas	
Comparación de Vehiculos	Atrás
Seleccione ciclo de conducción a comparar :	
1) Ciclo Montevideo completo 👻 🗸	
Seleccione vehiclos a comparar :	
Vehiculo 1 Vehiculo 2	
Renault Kangoo 🗸 🗸 Nissan Leaf	• 🗸
Ver parámetros Comparar!	
	-
Seleccione parametro :	
Seleccionar	

Figura 9.29: Seleccionar el segundo vehículo.

Análogamente, se carga el vehículo 2. La figura 9.29 muestra el ciclo de conducción escogido, y los dos vehículos a comparar.

Comparación d	e Vehiculos	Atrás
Seleccione ciclo de conducción a compa	rar :	
1) Ciclo Montevideo completo 💽 🗸		
Seleccione vehíclos a comparar :		
Vehiculo 1	Vehiculo 2	
Renault Kangoo 🔹	Nissan Leaf	• •
Ver parámetros	Comparar!	
Seleccione parametro : Seleccionar SOC (%) Seleccionar		
SUC Inicial (%):		
SOC Final (%):		
Energía consumida (kWh):		
Vehiculo 2 SOC Inicial (%):		
SOC Final (%):		
Energía consumida		
(kWh):		

Figura 9.30: Seleccionar parámetro a comparar entre los vehículos.

Luego, se debe seleccionar el parámetro que dese
amos comparar. Se puede elegir entre el SOC (%) y la Energía consumida (kWh). La figura 9.30 muestra el

Capítulo 9. Interfaz Gráfica



menú desplegable donde se elige el parámetro a comparar.

Figura 9.31: Botón para comparar parámetros y gráficos correspondientes.

Luego para comparar, se debe hacer clic en el botón "Comparar!". La interfaz desplegará un gráfico con el parámetro que se está comparando entre los dos vehículos. También se obtiene el % del SOC inicial y SOC final de cada VE luego de realizado el ciclo de conducción escogido, y la energía consumida por cada vehículo.

Si se desea ver los parámetros de cada VE seleccionado, se debe hacer clic en el botón "Ver parámetros", como se observa en la figura 9.31.



Figura 9.32: Interfaz donde se muestra los parámetros de cada VE y el ciclo de conducción seleccionado.

9.1. Manual de usuario

La figura 9.32 muestra los parámetros de cada VE seleccionado, y el ciclo de conducción utilizado. Para salir de la interfaz presionar el botón "Atrás".

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.
Capítulo 10

Prueba ciclo de conducción urbano en vehículo eléctrico

Dentro del alcance del proyecto se pretendía tener una instancia de pruebas y mediciones en un vehículo eléctrico real como forma de poder validar el modelado. Para ello se logró colaboración por parte de la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE), en donde se puso a disposición un vehículo eléctrico de su flota y un chofer habilitado para la conducción del mismo. Se aprovecha esta instancia para agradecer al Ing. Federico Ragni, quien fue el conductor y tuvo la amabilidad y buena disposición de responder todas las consultas que surgieron en esta instancia.

Para la ocasión se creó un plan de trabajo que implicó elaborar los recorridos a realizar, analizar los datos que correspondía relevar sobre el vehículo y los trayectos, y equiparse para realizar las medidas adecuadamente. Se debió estudiar también la manera de relevar el perfil de pendientes del recorrido, que toma relevancia al estar comparando los consumos reales del VE.

En la elaboración del recorrido se incluyeron: trayectos con pendientes pronunciadas, trayectos en los cuales se pudiera aumentar la velocidad, trayectos con rambla y trayectos urbanos. Las aplicaciones para teléfonos móviles utilizadas para registrar el recorrido y el perfil de velocidades fueron probadas en lo previo en recorridos en automóvil a gasolina y en ómnibus del transporte colectivo.

10.1. Vehículo utilizado en las pruebas

El vehículo tiene como datos principales los siguientes:

- Marca: Renault
- Modelo: Kangoo ZE Maxi
- Masa: 1553 kg
- Tensión nominal de la batería: 360 V

Capítulo 10. Prueba ciclo de conducción urbano en vehículo eléctrico

- Energía útil de almacenamiento: 22 kWh
- Potencia nominal del motor: 44 kW
- Potencia máxima de carga de la batería: 7,4 kW
- Velocidad máxima: 130 $\frac{km}{h}$
- Velocidad máxima en RPM: 10500 RPM
- Torque máximo motor: 226 Nm

El vehículo utilizado forma parte de la flota de UTE desde el año 2014 y es conducido por personal de UTE instruido especialmente para el manejo de vehículos eléctricos. Diariamente el vehículo es utilizado para realizar recorridos urbanos, dentro de la ciudad de Montevideo.

10.2. Recorridos realizados

Se realizaron cinco recorridos que se pueden observar en las figuras 10.1, 10.2, 10.3, 10.4 y 10.5. Dichos recorridos se describen a continuación:

Recorrido 1 (UTE - Cerro de Montevideo) - Se pretende generar un recorrido que tenga pendientes pronunciadas (por ej. cerro de Montevideo) junto con un recorrido urbano que implique no alcanzar grandes velocidades y al mismo tiempo tenga varias frenadas y arranques.



Figura 10.1: UTE - Cerro

Recorrido 2 (Cerro de Montevideo - Facultad de Ingeniería) - En este recorrido se tienen altas velocidades (Ruta 1) y también velocidades medias (rambla de Montevideo).



Figura 10.2: Cerro - Fac. Ingeniería

Recorrido 3 (Facultad de Ingeniería - Mdeo. Shopping) - En este recorrido se pretende generar un recorrido urbano (frenos y arranques) con velocidades bajas y medias. Este recorrido pasa por principales vías de la ciudad y a su vez une dos barrios poblados de la ciudad.



Figura 10.3: F. de Ingeniería - Mvdeo. Shopping

Recorrido 4 (Montevideo Shopping - Ciudad Vieja) - Este trayecto une dos zonas principales de la ciudad como los son Pocitos y Cuidad Vieja. Es un recorrido urbano muy usual los días hábiles por motivos laborales.



Capítulo 10. Prueba ciclo de conducción urbano en vehículo eléctrico

Figura 10.4: Mvdeo. Shopping - Ciudad Vieja

Recorrido 5 (Ciudad Vieja - UTE) - El trayecto final es un recorrido urbano que no alcanza grandes velocidades. Finaliza en el garage de almacenamiento de la flota de Vehículos de la UTE, sobre la calle Jujuy.



Figura 10.5: Ciudad Vieja - Jujuy

10.3. Datos recabados

La camioneta en la que se realizaron los recorridos permite observar en tiempo real el SOC, la potencia instantánea y la velocidad. También dispone de una computadora a bordo y un display en el cuál se pueden seleccionar distintos tipos de datos para un recorrido particular (cuenta con botón de reinicio) como: autonomía (km), distancia recorrida (km), velocidad media $(\frac{km}{h})$, consumo (kWh) y consumo medio $(\frac{kWh}{100km})$.

Para realizar los recorridos se reinicia la computadora a bordo de forma de obtener datos certeros de lo realizado en el día. Luego de finalizados cada uno de los cinco recorridos se procedió a registrar los datos que brindaba la computadora a bordo sin reiniciarla (por lo tanto, los datos se acumulan para todos los recorridos realizados). Los datos relevados son los siguientes:

Recorrido 1 (fig. 10.1):

- Autonomía: 82km
- Distancia: 12.1 km
- Velocidad media: 20.8 $\frac{km}{h}$
- \blacksquare Consumo: 2 kWh
- Consumo medio: 20.1 $\frac{kWh}{100km}$

Recorrido 2 (fig. 10.2):

- Autonomía: 77 km
- Distancia: 30.2 km
- Velocidad media: 27.2 $\frac{km}{h}$
- Consumo: 4kWh
- Consumo medio: 14.8 $\frac{kWh}{100km}$

Recorrido 3 (fig. 10.3):

- Autonomía: 73 km
- Distancia: 35 km
- Velocidad media: $25.7 \frac{km}{h}$
- Consumo: $5 \ kWh$
- Consumo medio: 14.8 $\frac{kWh}{100km}$

Recorrido 4 (fig. 10.4):

Capítulo 10. Prueba ciclo de conducción urbano en vehículo eléctrico

- Autonomía: 67 km
- Distancia: 42.1 km
- Velocidad media: 24.9 $\frac{km}{h}$
- Consumo: 6 kWh
- Consumo medio: 15.1 $\frac{kWh}{100km}$

Recorrido 5 (fig. 10.4):

- Autonomía: 65km
- Distancia: 46.4 km
- Velocidad media: 24.1 $\frac{km}{h}$
- Consumo: 7 kWh
- Consumo medio: 15.1 $\frac{kWh}{100km}$

Durante el manejo se tomo nota de aspectos relevantes. Se notó que la potencia máxima marcada en el tablero era de 49 kW, cuando el motor es de 44 kW nominales. También se registró que la potencia máxima de frenado regenerativo fue de aproximadamente 21 kWh. El vehículo llegó a la potencia máxima en varios tramos del recorrido total y llegó a regenerar el máximo (en potencia del frenado) también en varios segmentos.

Otro aspecto a considerar de la conducción es que al desacelerar (y sin presionar el freno) ya actúa el frenado regenerativo. En caso de ser necesario presionar el pedal de freno, la energía del frenado (debida a las pastillas de freno) no es utilizada para cargar la batería, por lo que en algunos casos una parte de la energía del frenado no se recupera.

UTE también proporcionó información adicional, obtenida de una aplicación que se ha desarrollado para uso de la institución, de la cual, como dato principal, se puede obtener el SOC del vehículo en función del tiempo.

Al iniciar los recorridos el vehículo tenía la carga completa (SOC=100%) y al finalizar el SOC era de 53%. Al culminar las pruebas se volvió al estacionamiento de la camioneta donde la misma fue conectada al cargador de pared o SAVE (Sistema de Alimentación de Vehículo Eléctrico) para cargarla. Al completar la carga, el medidor de energía registró una carga de 8.928 kWh. Esto marca una diferencia con lo proporcionado por la computadora a bordo (que había medido 7 kWh), pero se considera un dato más fiable el dato proveniente del medidor de

energía, ya que es el que tiene más sentido por lo siguiente; si el medidor de energía realizó una carga del 47 % (del 53 % al 100 %) entonces la capacidad máxima de almacenamiento de la batería correspondería a 19 kWh, lo cual es razonable. De considerar los 7 kWh, sería de 14.894 kWh. Además se considera como válida la medida del medidor de energía por la precisión que este tiene (se asume precisión de un medidor para facturación).

10.4. Procesamiento de datos

Además de los datos recabados y facilitados por UTE, se debieron procesar otr2os datos para poder incluirlos en el Modelo de Matlab.

Para crear el ciclo de conducción fue necesario relevar los datos de **velocidad** (en m/s ó km/h) en función del tiempo. Para esto se utilizaron varias aplicaciones para dispositivos móviles que registran ese parámetro. Las aplicaciones utilizadas fueron (*SpeedLogger* [71] y *SpeedBot* [72]). Además éstas aplicaciones registran la posición en función del tiempo. Previo a su utilización en las pruebas con la Kangoo se comprobó que midieran de forma correcta velocidad, tiempo y ubicación. Durante las pruebas, cada vez que se iniciaba un recorrido nuevo se iniciaban las medidas. Se registraron utilizando varios dispositivos móviles al mismo tiempo de forma de tener un respaldo para las medidas obtenidas y poder contrastar diferencias (en caso de que las hubieran).

Los datos aportados por las aplicaciones se exportan a formato excel y se ingresan al modelo de Matlab como vectores de Velocidad y Tiempo. La velocidad ingresada es la velocidad de referencia que debe alcanzar el vehículo en las simulaciones. En el modelo, el bloque *Conductor* (explicado en el punto 8.4) se encarga de dar la consigna de aceleración (o desaceleración) necesaria para que el vehículo siga la velocidad de referencia.

Otro dato relevante que se debe procesar son las **pendientes (o inclinacio-nes)** de los distintos recorridos.

Durante las pruebas y ensayos de autonomía con ciclos internacionales (NEDC, WLTP u otros) las inclinaciones del terreno no son consideradas. Esto en un recorrido real es totalmente falso ya que no representa de forma correcta el andamiento del vehículo.

Mediante el software para PC *GoogleEarthPro* se pueden obtener las pendientes del terreno. Para ello se traza en el mapa el recorrido realizado y se obtiene el perfil de elevación en dicho trayecto.

El software calcula las pendientes (% de inclinación) a partir de las diferentes alturas de terreno en función de la distancia. La figura 10.6 muestra la información brindada por el programa.



Capítulo 10. Prueba ciclo de conducción urbano en vehículo eléctrico

Figura 10.6: Pendientes obtenidas para el recorrido UTE-Cerro a través de Google Earth.

De manera de poder ingresar los datos de la inclinación en el modelo de Matlab, para hallar la pendiente (en grados) en cada parte del recorrido, se utilizan relaciones trigonométricas con la distancia recorrida entre dos puntos y en la diferencia de alturas entre esos dos puntos. Como regla se utiliza la referencia que una pendiente de 45° corresponde a un porcentaje de 100% de inclinación.

Notar que los vectores de tiempo, velocidad y pendiente deben tener la misma cantidad de datos. En el modelo se ingresa un vector (vector *Alpha*) con las pendientes a lo largo de su trayecto, los cuales como se verá más adelante afectan de manera directa el rendimiento del vehículo.

En todo el ciclo completo Montevideo, considerando los 5 recorridos realizados, la inclinación máxima es de $5,0^{\circ}$ y la mínima es de -5.2° . Durante la mayor parte de los recorridos realizados las pendientes obtenidas no sobrepasan los 2° (en valor absoluto). El promedio de las pendientes relevadas en todo el ciclo completo es de 0.035° .

10.5. Simulación Ciclo Completo Montevideo

El objetivo de esta sección es comparar el modelo realizado en Matlab con el recorrido real en la Renault Kangoo.

Se le llama ciclo completo Montevideo a la unión de los cinco recorridos (UTE - Cerro - Fing - Mdeo. Shopping - Ciudad Vieja - UTE).

Para simular se cargan los datos del vehículo (Renault Kangoo) en el Workspace de Matlab.

10.5. Simulación Ciclo Completo Montevideo

En cuanto a la batería, se considera que la misma tiene una capacidad máxima de almacenamiento de energía de 19 kWh (esto se desprende de lo explicado en el punto 10.3). Notar que los 19 kWh de energía tienen sentido, ya que el vehículo cuenta con varios años de uso, lo cual hace que su rendimiento no sea el mismo que al comienzo de su vida útil. En este caso la Renault Kangoo pasa de tener una energía máxima de 22 kWh a tener 19 kWh utilizables, lo cual en el modelado puede transmitirse como que la batería tiene un estado de salud de 0.8636 ($SOH = \frac{19kWh}{22kWh} = 0.8636$.

Otra consideración que hay que tomar para el correcto modelado del ciclo completo Montevideo es que la batería no comienza el recorrido con un 100% del SOC. Esto es debido a que antes de comenzar el primer recorrido UTE-Cerro se trasladó el vehículo hasta una estación de servicio para controlar la presión en las ruedas. Este traslado inicial hizo que disminuya el estado de carga del 100% al 97% e implicó recorrer 3.0 km. Por lo tanto para poder comparar correctamente la simulación con el ciclo real se debe considerar un SOC inicial de 97 %. También deben restarse 3.0 km de la distancia registrada por el vehículo para cada uno de los recorridos, eso hace que por ejemplo, la distancia recorrida en el ciclo completo Montevideo sea aproximadamente de 43.4 km (según la medida de la computadora a bordo). Esto último también tiene impacto en la energía consumida por el vehículo. Se debe calcular la energía consumida únicamente en los recorridos, por lo que se debe descontar la energía que consumió el vehículo para llegar a la estación de servicio desde donde se inician los recorridos. Por esto se considera entonces una aproximación lineal en donde la energía consumida en esos 3.0 km equivale a $0.58 \ kWh \ y$ por lo tanto la energía que se debería consumir en el ciclo completo Montevideo es de $8.34 \ kWh$.

A continuación se presentan las principales características del vehículo y de la baterías luego de realizar la simulación del ciclo completo Montevideo. En las figuras 10.7, 10.8, 10.9, 10.10, 10.11, 10.12 y 10.13 se pueden observar los gráficos obtenidos.

Capítulo 10. Prueba ciclo de conducción urbano en vehículo eléctrico



• Vel. del vehículo (km/h) y Vel del motor (rpm):

Figura 10.7: Simulación de velocidades para el ciclo completo Montevideo

En la figura superior de 10.7 se puede observar que la velocidad del vehículo sigue correctamente a la velocidad de referencia.

En la figura inferior de 10.7 cabe destacar que no se llega a la velocidad máxima del motor para el modelo de vehículo utilizado, siendo la misma de 10500 rpm. Esto es coherente dado que durante el recorrido no se alcanzan a 130 km/h que es la máxima velocidad del vehículo. Recordar que hay una relación lineal entre la velocidad en rpm del motor y la velocidad lineal (en km/h) del vehículo. El pico máximo de velocidad observado es de aproximadamente 7000 rpm, que correspondería, según la relación de transmisión determinada por 10500 rpm ~ 130 km/h, a aproximadamente 87 km/h. En la figura superior se observa como la velocidad máxima es algo inferior a los 90km/h, lo que ratifica que la relación de transmisión fue bien implementada.

10.5. Simulación Ciclo Completo Montevideo



Torque motor:



Observar que el torque (figura 10.8) del motor está limitado al torque máximo para la Renault Kangoo (226 Nm). También notar que hay valores positivos y negativos. Los valores negativos del torque corresponden al frenado/desaceleración del motor.



• SOC (%):

Figura 10.9: Simulación de SOC para el ciclo completo Montevideo

En la figura 10.9 se puede ver el andamiento del SOC en función del tiempo del ciclo completo Montevideo. El valor del SOC al finalizar recorrido es de

Capítulo 10. Prueba ciclo de conducción urbano en vehículo eléctrico

53.6%. Esta es una buena aproximación ya que en la prueba real, el estado de carga final indicado en el vehículo era de 53% (un 1.1% de error).



• Corriente en la batería (A):

Figura 10.10: Simulación de corriente para el ciclo completo Montevideo

En la figura 10.10 se observan corrientes tanto negativas como positivas. Las corrientes positivas corresponden a la demanda del motor para impulsar el vehículo, y las corrientes negativas corresponden al frenado regenerativo.



• Tensión en la batería (V):

Figura 10.11: Simulación de tensión para el ciclo completo Montevideo

En la figura 10.11 se observan en rojo la tensión de vacío de la batería y en azul la tensión en bornes de la misma. Se nota la tendencia descendiente de

10.5. Simulación Ciclo Completo Montevideo

la tensión con el correr del tiempo. Los valores de la tensión en bornes de la batería oscilan alrededor de la tensión de vacío. Cuando se tienen corrientes negativas (frenado regenerativo) el valor de tensión en bornes aumenta. Para valores positivos de corriente, disminuye la tensión. La tensión de vacío es decreciente debido a la dependencia del SOC en el modelo implementado.



• Potencia en la batería (kW):

Figura 10.12: Simulación de potencia para el ciclo completo Montevideo

La curva de potencia en la figura 10.12 es similar en forma a la curva de la corriente (figura 10.10). Se visualiza con claridad la potencia límite. Se impuso una potencia límite para el motor superior a la nominal (un 10% extra). La potencia en la batería considera también las potencias de pérdidas (tanto eléctricas como mecánicas) y en caso de corresponder, la potencia de servicios auxiliares. Para el frenado, como fue observado en el recorrido en la Kangoo real, la potencia se limita a la mitad de la potencia del motor.

Capítulo 10. Prueba ciclo de conducción urbano en vehículo eléctrico



• Energía consumida(kWh):

Figura 10.13: Simulación de energía para el ciclo completo Montevideo.



Figura 10.14: Zoom para observar parte de la energía generada en el ciclo Montevideo completo.

En la figura 10.13 se aprecian las pequeñas cargas de la batería durante el frenado, esta vez como curvas que decrecen la energía consumida. En la figura 10.14 se aprecia un zoom a un intervalo del ciclo Montevideo en el cual se tiene una recuperación de energía. El valor final de la energía consumida es de 8.24 kWh. Se considera un valor satisfactorio ya que en el recorrido real se registró un consumo de 8.34 kWh, lo que implica un -1.2% de error entre el modelo y la realidad.

Capítulo 11

Validación de los modelos

En la presente sección se encuentra la validación de los modelos de los vehículos utilizados (ver Capítulo 5). Para cada uno de ellos, se verificará que los valores de autonomía (en km) simulados utilizando los ciclos de conducción que usa el fabricante (NEDC y WLTP), den valores coherentes con los especificados por los catálogos del mismo.

Para el caso particular de la Renault Kangoo, como ya se describió en el Capítulo 10, se valida el modelo con el ensayo realizado, pero se verifican en esta sección los resultados de autonomía simulados con los que declara el fabricante para los Ciclos de Conducción internacionales.

También en esta sección se estudia, con el modelo de carga de la batería implementado, la comparativa entre el tiempo de carga declarado y el tiempo de carga simulado con el algoritmo implementado.

Se observó durante la implementación de los modelos, que entre las variables de influencia en el consumo del vehículo, es posible y práctico ajustar la respuesta particular de cada vehículo a los cambios de velocidad (velocidad deseada vs velocidad real). De esta forma, ajustando los parámetros del sistema de control (constantes kp y ki, ver 8.4), se puede realizar un ajuste fino del consumo de cada vehículo, de manera que se ajuste al consumo real, o el declarado por el fabricante. Al ajustar el tiempo de respuesta del vehículo al pedal del acelerador, se ajusta la respuesta del torque realizado por el motor, así la potencia instantánea y por ende el consumo del vehículo. De esta manera se calibra el modelo.

Ha de considerarse que no se cuenta con algunos datos relevantes de los vehículos, que sirven para estimar de mejor manera las pérdidas. Por ejemplo la resistencia interna de la batería, las pérdidas generadas en los convertidores de electrónica de potencia, o la eficiencia del motor en diferentes puntos de operación. Al ajustar la respuesta del vehículo en consumo de potencia mediante el sistema de control, es posible realizar un ajuste fino del rendimiento del vehículo en kWh/km mediante las constantes kp y ki mencionadas anteriormente.

Habiendo ajustado los parámetros para todos los modelos se obtienen los resultados mostrados en las siguientes secciones. Capítulo 11. Validación de los modelos

11.1. Autonomía

En ésta sección se compara la autonomía dada por el fabricante para un determinado ciclo de conducción con la autonomía simulada en el modelo de Simulink. Esto se realiza para todos los vehículos.

Vehículo	Ciclo de conducción	Autonomía del fabricante (km)	Autonomía simulada (km)	Error relativo (%)
	NEDC	199 [73]	198.3	-0.35
Nissan Leaf				
	WLTP clase 3	155.8*	157.9	1.35
	NEDC	170 [74]	167.6	-1.41
Renault Kangoo				
	WLTP clase 3	133.1*	149.3	12.17
	NEDC	403 [24]	384.3	-4.64
Renault Zoe				
	WLTP clase 3	300 [75]	314.0	4.67
	NEDC	300 [76]	300.7	0.23
BYD E6				
	WLTP clase 3	234.9*	251.6	7.11
	NEDC	160 [77]	163.7	2.31
Volkswagen E-Up!				
	WLTP clase 3	134 [78]	128.3	-4.25

Tabla 11.1: Comparación autonomía del fabricante vs autonomía simulada.

* Valor estimado según el procedimiento indicado en el apéndice B.

En la tabla 11.1 se muestra la autonomía para cada vehículo dada por el fabricante y la simulada.

Recordar que la Renault Kangoo indicada en la tabla anterior corresponde al modelo de 22 kWh.

Como primer comentario, se observa que algunos vehículos no poseen datos de autonomía para el ciclo WLTP oficiales, por lo tanto en esos casos se estima su valor (según lo desarrollado en el apéndice B). Lo anterior es debido a que el ciclo WLTP se introdujo en el mercado en el año 2017 (tal como se indica en el capitulo 6) y es obligatorio a partir del 1ero de Setiembre de 2018 para todos los vehículos nuevos. Por lo cual, los vehículos cuyos modelos son anteriores a la fecha mencionada no están obligados a testear bajo el ciclo WLTP. Muchos fabricantes, por su conveniencia, optan entonces por indicar únicamente la autonomía con el ciclo NEDC (ya que se obtienen valores más altos de autonomía).

Se evalúa el error relativo que se tiene entre las autonomías (teórica vs simulada) para los ciclos NEDC y WLTP.

Para el caso de autonomía en ciclo WLTP estimada (marcada con *) el error relativo tendrá valores más dispares (12.17% en la Kangoo y 7.11% en el BYD E6) justamente 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 (NEDC y WLTP) del fabricante, se observa que el modelado es aceptable, ya que para ambos ciclos el error máximo es 4.67%.

Hubiese sido deseable ensayar todos los vehículos para realizar un ajuste similar al de la Kangoo, ya que es el único que se podría llamar un "ajuste real", dado que derivó de una experiencia realizada. En la medida que se hubiesen podido ejecutar más ensayos en los otros vehículos, se podrían realizar ajustes más profundos.

Para el caso particular de la Kangoo, se destaca que no habiendo ajustado su consumo para cumplir con el ciclo NEDC, el error relativo es muy bajo (-1.41%), por lo que se verifica de este modo que el modelo, y el ajuste realizado con la prueba "real" funcionan satisfactoriamente.

11.2. Carga

En esta sección se compara el modelo genérico realizado para la carga, aplicado a cada vehículo. Se busca verificar que los tiempos de carga declarados por el fabricante coincidan, o mantengan un grado aceptable de coherencia con los valores simulados.

Vehículo	Potencia	Tiempo de carga	Tiempo de carga	Nivel de carga (%)
	ue carga (KW)	dei labricante	Sillulado	
	3.3 kW AC	8h [79]	8h 12m	0 - 100
Nissan Leaf				
	35 kW DC	26m [79]	27m	10 - 80
Renault Kangoo	3.6 kW AC	6h-8h [80]	7h 42m	0 - 100
	3.7 kW AC	13h15m [81]	12h42m	0 - 100
Renault Zoe				
	22 kW AC	2h40m [24]	$3h \ 1m$	0 - 100
BYD E6	30 kW AC	2h15m* [82]	2h 40m (1h 52m)	0 - 100
	3.7 kW	5h15m [83]	6h	0 - 100
Volkswagen E-Up!				
	40 kW	17m [83]	18m	10 - 80

Tabla 11.2: Comparación tiempo de carga del fabricante vs tiempo de carga simulado. * Carga del 0 al 100 % a corriente constante. No utiliza etapas de ecualización.

La tabla 11.2 muestra los tiempos de carga que brinda el fabricante y los obtenidos mediante la simulación para cada vehículo. Cabe destacar que el modelo implementado es genérico para todos los vehículos (según se describe en las secciones 4.4.5 y 8.6.2.2), y que si se desea hilar más fino en cuanto a la carga de los mismos, se debe aplicar su algoritmo particular de carga para cada uno. La información de cómo se realiza la carga de cada vehículo no es fácilmente accesible ya que cada fabricante se reserva la información del manejo de la batería (y muchas veces, también de los datos de la batería propiamente dichos). Es por esto que se decide aplicar una curva estándar de carga. Los tiempos podrían mejorar ajustando las etapas de carga lenta descriptas en la sección de modelado para cada vehículo.

El Nissan Leaf con la carga a 3.3 kW tiene un error absoluto de 8.2% y con

Capítulo 11. Validación de los modelos

la carga a 35 kW tiene un error absoluto de 3.85%. Al ser ambos errores menor al 10% se considera aceptable el modelo de carga para el Nissan Leaf.

Con la **Renault Kangoo**, el fabricante especifica un rango de tiempo en el cual asegura que se carga del 0 al 100 % con una potencia de 3.6kW. La simulación cae dentro de ese rango, con lo cual se considera correcto el modelo de carga para la Kangoo.

El **Renault Zoe** con una carga lenta de 3.7 kW tiene un error absoluto de 3.77%, lo cual se considera aceptable. En cambio para la carga rápida (22 kW), el error es de 15.6% > 10%. Esto puede deberse a una diferencia en el modelo utilizado para el estado de ecualización en la carga (carga desde el 80% del SOC hasta el 100% del SOC), con lo cual se concluye que para el Renault ZOE el modelo de carga es aceptable para cargas lentas.

Para el **BYD E6**, los datos que se obtienen para la carga de ensayos de UTE, son con carga rápida (30 kW) desde el 0 al 100 % sin etapa de ecualización, lo cuál significa que se carga siempre a corriente constante. En cambio el modelo en Simulink incluye la etapa de ecualización, por eso es que se tiene que según el modelo implementado (cuatro etapas de carga), el tiempo de carga resultante es de 2h40m, lo cual implica un error en tiempos de carga de 18.5 %. Si se simula solamente el período de carga a corriente constante (0 al 80 % del SOC) y se extrapola el tiempo de carga desde el 80 % al 100 %, se obtiene que el tiempo simulado que tarda en cargarse es de 1h52m, con lo cual el error absoluto es de 17.0 %.

Finalmente para el **Volskwagen E-Up!**, con una carga lenta a 3.7 kW se obtiene un error de 9.52% y para la carga rápida a 40kW el error es de 5.88%. Como ambos son menores al 10% se considera que el modelo de carga para el Volskwagen E-Up!es aceptable.

11.3. Vida útil de la batería

A continuación se evalúa la garantía (en km) dada por el fabricante de cada vehículo (sólo los de baterías NMC) y se compara con la cantidad de km que es capaz de entregar la batería en la simulación, hasta que su capacidad máxima llegue al 80% (valor en el cual se considera que finaliza la vida útil para uso en VEs, ver explicación de este valor al final de la sección 7.4.2) con diferentes ciclos de conducción.

11.3. Vida útil de la batería

Vehículo	Garantía en km	Ciclo de conducción simulado	Cantidad de km estimados mediante simulación, hasta un 80 % del SOH
		NEDC	635.248
Renault Zoe	160.000 km [84]	WLTP clase 3	525.636
		Montevideo Completo	426.786
		NEDC	276.162
Volkswagen E-Up!	160.000 km [85]	WLTP clase 3	214.518
		Montevideo Completo	125.381

Tabla 11.3: Comparación entre la garantía de la batería del fabricante en km y la simulación de la vida útil de la batería para uso en un VE.

En la tabla 11.3, para obtener el valor en la columna "Cantidad de km estimados mediante simulación, hasta un 80 % del SOH", se procede a agotar la batería con el ciclo de conducción elegido (NEDC, WLTP o Montevideo Completo), una vez finalizado se obtienen los km de autonomía con el ciclo elegido. Luego se utiliza el algoritmo implementado del SOH para hallar el número de ciclos que la batería es capaz de realizar antes de que su capacidad de degrade al 80 %. Por último, el producto entre el número de ciclos con la autonomía obtenida para el ciclo de conducción genera el valor que se introduce en dicha columna.

Se obtiene de este modo el kilometraje total que el vehículo es capaz de recorrer agotando la batería totalmente con un determinado ciclo de conducción, durante la vida útil de la misma. Cabe destacar que pocos usuarios (o casi ninguno) realizarán este tipo de descarga profunda antes de cargar su batería, por lo que la vida útil en km podrá cambiar según el uso real que se le dé al vehículo. Este escenario es uno de los peores previstos en cuanto a la duración de la batería, según el algoritmo para el SOH implementado.

Es importante notar que el algoritmo del SOH implementado en este proyecto es aplicable sólo para baterías de NMC (óxido de Litio Níquel Manganeso Cobalto), por lo que sólo aplica para los vehículos Renault Zoe y VW E-Up!, que son los que utilizan este tipo de química en sus baterías. Se recuerda al lector que en las nuevas aplicaciones de VEs predominan las baterías de NMC, por lo que se decidió seguir por este camino para la implementación del SOH.

De la tabla 11.3, se observa que:

Los kilometrajes obtenidos mediante simulación presentan valores que van decreciendo a medida que el ciclo utilizado es más exigente. El ciclo NEDC es el menos exigente de los tres, seguido por el WLTP y luego el Montevideo. Para el Zoe, el NEDC es un 21 % menos exigente que el WLTP, para el E-up! un 29 %. El ciclo WLTP para el Zoe es un 23 % menos exigente que el Montevideo, y un 70 % menos exigente para el E-up!. Este último valor de distancia de un 70 % es llamativo, por la distancia con los restantes valores.

Capítulo 11. Validación de los modelos

Se analizará esta diferencia más adelante en la presente sección.

- Para el Renault Zoe, el kilometraje que es capaz de recorrer en su vida útil (realizando cada ciclo hasta un DOD del 100%) es siempre mayor que el garantido por el fabricante. Es entonces que se puede concluir, que según el algoritmo del SOH implementado, el fabricante está cubierto desde el punto de vista de kilometraje. Es esperable que los valores de km estimados mediante simulación sean mayores a los km de garantía del fabricante, ya que el mismo usualmente asegura una garantía que realmente pueda cumplir para que esto no le genere gastos adicionales.
- El caso del VW E-Up! para el Ciclo Montevideo, sin embargo no llega a cumplir las condiciones que el Renault Zoe cumple con holgura. Para los Ciclos NEDC y WLTP, la vida útil calculada (en km) por el algoritmo del SOH implementado, está por encima de lo que el fabricante garantiza, pero para el caso del Ciclo Montevideo, el resultado obtenido arroja que el fabricante debería reponer las baterías de los vehículos que se utilizaran con esta intensidad. Cabe destacar que este valor esta vinculado fuertemente a la autonomía del vehículo con el ciclo de conducción y no solamente con el algoritmo del SOH.

Se puede especular con el por qué de este resultado. El fabricante puede haber fijado una garantía umbral muy cercana al deterioro de su batería con un ciclo real especulando con las ventas y trazando ecuaciones económicas, considerando que este tipo de uso intensivo no fuese el usual. Puede que para determinar la garantía, se haya considerado un ciclo menos exigente para evaluar el E-up!, como por ejemplo, el NEDC o WLTP, que según el cálculo realizado alcanzan el kilometraje garantido.

Para este tipo de casos, en los cuales no se tienen datos relevados en campo, o experimentos para realizar y contrastar las diferencias, sería necesario (o útil) realizar pruebas reales (tal como se hizo con la Renault Kangoo) para determinar los ajustes correctos y proceder a evaluar nuevamente el modelo. El realizar experimentos permitiría, entre otras cosas, verificar la autonomía real con un ciclo de conducción que incluya pendientes.

La caída del 70 % de vida útil entre el WLTP y el ciclo Montevideo utilizando el E-up! está fuertemente vinculada a la diferencia de autonomía que da el E-up! para estos ciclos. La diferencia porcentual en autonomía entre los ciclos WLTP y Montevideo para todos los vehículos será analizada en la sección 12.1.1, y particularmente, se puede observar en la tabla 12.1 de dicha sección que la diferencia porcentual entre las autonomías mencionadas es del 66 %, por lo tanto es el peso mayor que afecta la vida útil (en el 70 % de diferencia de vida útil).

Capítulo 12 Estudios realizados

En el presente capítulo se desarrollan diferentes estudios que utilizan todas las herramientas previamente presentadas.

Se comienza realizando un análisis de los distintos ciclos de conducción internacionales para evaluar que tan bien representan la realidad (comparando con el recorrido real en Montevideo, o ciclo Montevideo). Además se estudia el efecto de agregar pendientes a los recorridos internacionales para evaluar cómo esto afecta desde el punto de vista de autonomía, y de exigencia al vehículo.

Posteriormente se realizan estudios que comparan los vehículos desde el punto de vista de los rendimientos obtenidos para los distintos ciclos de conducción. Se contrastan estos resultados con los datos que brinda el fabricante.

Se crea un ciclo de conducción "Estándar" (que representa un perfil de velocidades netamente urbano) y se evalúan los vehículos en distintos casos (por ejemplo realizando descargas V2G). En cada caso se evalúa la vida útil de la batería luego de cada situación.

12.1. Comparativa de ciclos de conducción e influencia de la pendiente

Con el fin de determinar que tan reales o aplicables son los ciclos internacionales (en particular NEDC y WLTP), se comparan los mismos contra el Ciclo Montevideo, que es un ciclo real. Se analizará la relevancia de incorporar pendientes al recorrido real relevado, y la diferencia obtenida con los ciclos internacionales. También se realizarán simulaciones incorporando pendientes a los ciclos WLTP y NEDC para observar el impacto de la misma en los ciclos y ver si la relación entre el ciclo real y los mencionados mejora.

Las comparaciones abarcarán la autonomía que puede obtenerse con los distintos ciclos, así como también la forma que estos ciclos exigen a las características del vehículo.

Capítulo 12. Estudios realizados

12.1.1. Autonomía

Se pretende comparar la autonomía obtenida con los distintos ciclos trabajados. En particular se estudiará la adaptabilidad de los ciclos WLTP y NEDC en comparación con el Ciclo Montevideo implementado.

Tanto el WLTP como el NEDC tienen una etapa de baja exigencia y una de exigencia mayor. El Ciclo Montevideo cumple con características similares, por lo que se considera prudente realizar la comparación. Cabe destacar que los Ciclos Internacionales no asocian ninguna pendiente, mientras que el Ciclo implementado las contempla.

La tabla 12.1 muestra las autonomías obtenidas en las simulaciones al correr los distintos vehículos con los ciclos WLTP, NEDC y Montevideo.

Autonomía (km) - Comparativa de Ciclos Internacionales vs Ciclo Montevideo							
Ciclo	Nissan Leaf	Renault Kangoo	Renault Zoe	BYD E6	VW E-UP!		
NEDC	198.3	167.6	384.3	300.7	163.7		
WLTP	157.9	149.3	314.0	251.6	128.3		
Montevideo	110.7	112.0	257.1	218.5	77.3		
Diferencia NEDC vs Montevideo (%)	79.1	49.6	49.5	37.6	111.8		
Diferencia WLTP vs Montevideo (%)	42.7	33.3	22.1	15.1	66.0		

Tabla 12.1: Comparación entre las autonomías de los Ciclos NEDC, WLTP y Montevideo.

De la tabla 12.1 surge entonces que:

- Para el Ciclo NEDC, las autonomías difieren con el Ciclo Montevideo entre un 49.5 % y un 111.8 % en los diferentes vehículos.
- La diferencia entre el WLTP y el Ciclo Montevideo está entre un 15.1 % y un 66 %.
- Para todos los vehículos, el WLTP aproxima mejor al Montevideo que el NEDC.
- El WLTP es más exigente que el NEDC, ya que la autonomía simulada con el mismo es menor para todos los vehículos.
- El Ciclo Montevideo resulta más exigente que los demás. El caso del ByD E6 es en el que el WLTP se acerca más, pero dista un 15.1 %, distancia que se considera muy elevada.

¿Por qué distan tanto los ciclos WLTP y NEDC del Ciclo Montevideo? Para evaluar esto, se prueba con la Renault Kangoo, correr un Ciclo Montevideo, pero sin considerar la pendiente (inclinación cero). La autonomía de la Kangoo con el ciclo Montevideo sin pendiente fue de 144.9 km. Comparando este valor con los valores de la tabla 12.1 para la Kangoo en NEDC y WLTP se tienen errores del 15.7% y de un 3% respectivamente. Los errores son considerablemente menores, particularmente el 3% de distancia con el WLTP. Esto hace pensar que el perfil de velocidad-tiempo del WLTP se ajusta correctamente al perfil del Ciclo Montevideo, por lo que, para este caso de vehículo y de ciclos, se considera que la pendiente tiene un peso muy relevante.

12.1. Comparativa de ciclos de conducción e influencia de la pendiente

Es interesante entonces, estudiar como se ven afectados los Ciclos de Conducción Internacionales con el hecho de agregar pendientes, de modo de conocer si es posible lograr una mejor adaptación a un ciclo real. Para lograr esta comparación se decidió agregar a los Ciclos WLTP y NEDC una pendiente constante, con el valor promedio de uno de los cinco tramos del Ciclo Montevideo. Se optó por utilizar la mayor pendiente promedio obtenida, que corresponde al recorrido 4, "Montevideo Shopping - Ciudad Vieja", mencionado en el capítulo 10.2. La mencionada pendiente es una inclinación de 0,2243°. Para el caso del Ciclo Montevideo se consideró prudente conservar la pendiente real.

La comparativas de los ciclos sin pendiente y con pendiente pueden observarse a continuación en las tablas 12.2, 12.3 y 12.4.

Autonomía (km) - Ciclo NEDC						
Terreno Nissan Leaf Renault Kangoo Renault Zoe BYD E6 VW E-UP!						
Sin Pend.	198.3	167.6	384.3	300.7	163.7	
Con Pend.	167.8	135.5	331.5	241.0	139.8	
Diferencia (%)	15.4	19.2	13.7	19.9	14.6	

Tabla 12.2: Efecto de considerar la pendiente en la autonomía para el ciclo NEDC.

Autonomía (km) - Ciclo WLTP						
Terreno Nissan Leaf Renault Kangoo Renault Zoe BYD E6 VW E-UF						
Sin Pend.	157.9	149.3	314.0	251.6	128.3	
Con Pend.	133.3	127.7	266.5	217.9	108.7	
Diferencia (%)	15.6	14.5	15.1	13.4	15.3	

Tabla 12.3: Efecto de considerar la pendiente en la autonomía para el ciclo WLTP.

Autonomía (km) - Ciclo Montevideo						
Terreno Nissan Leaf Renault Kangoo Renault Zoe BYD E6 VW E-UI						
Sin Pend.	152.5	144.9	338.4	283.8	103.6	
Con Pend.	114.1	112.0	257.1	218.5	77.3	
Diferencia (%)	25.2	22.7	24.0	23.0	25.4	

Tabla 12.4: Efecto de considerar la pendiente, en el ciclo Montevideo en la autonomía de los distintos Vehículos.

Se puede observar que para el ciclo NEDC, el agregar la pendiente, genera que la autonomía disminuye con respecto al caso sin pendiente, entre un 13.7 % y un 19.9 % (todos los valores se encuentran dentro de un margen de 16.9 % \pm 3 %). Para el ciclo WLTP la misma varía entre un 13.4 % y un 15.6 % (los resultados se encuentran dentro de un 14.5 % \pm 1.1 %) y para el Ciclo Montevideo el efecto es mayor, situándose entre un 22.7 % y un 25.2 %.

Por lo anterior se ve que el efecto de agregar pendientes en los ciclos es significativa, independientemente de cuál sea el ciclo estudiado. Además notar que

Capítulo 12. Estudios realizados

para cada ciclo, el porcentaje de diferencias se encuentra dentro de un margen; por ejemplo, para el ciclo Montevideo, la diferencia de agregar las pendientes para los distintos vehículos se encuentra dentro de la franja $24\% \pm 1.3\%$. De estudiar otros vehículos, es natural pensar que el peso porcentual de considerar las pendientes debería estar dentro del margen antes mencionado.

El ciclo Montevideo es el que mejor refleja la influencia de la pendiente, ya que fue relevado en forma real durante los recorridos, ajustado para lo realizado y verificado con la autonomía definida por el fabricante con el ciclo NEDC (en la Renault Kangoo).

Además los resultados anteriores reflejan que se debe tener precaución al estudiar autonomías con ciclos internacionales, ya que las mismas no consideran las pendientes. En condiciones un poco más reales, si se consideran pendientes, las autonomías dadas por estos ciclos decrecen de forma importante. ¿Qué inclinación habría que agregar al Ciclo WLTP para que represente el consumo?, ¿Cómo se puede relacionar con las pendientes del ciclo real? De lo presentado, se puede deducir que para aproximar al Ciclo Montevideo, no es suficiente considerar la pendiente promedio máxima de los cinco recorridos. Se deberían realizar más pruebas para llegar a ajustar los resultados, pudiendo probar, por ejemplo, con el valor medio del recorrido total, el máximo de los valores medios de los tramos marcados, ó la mínima de las pendientes máximas de los tramos, entre otras variables.

El caso del VW E-up! es el que marca una mayor distancia entre las autonomías declaradas y la autonomía simulada con el ciclo Montevideo, con un 111.8 % con el NEDC y un 66.0 % con el WLTP (ver tabla 12.1). Es llamativo que el modelo marque esa distancia para el E-up! en particular. No se puede concluir si el modelo presenta alguna incompatibilidad o error para este vehículo en particular, o si efectivamente su rendimiento varía tanto con el perfil de velocidades y pendientes del ciclo Montevideo. Para obtener conclusiones más determinantes se podría realizar un test drive repitiendo al menos el recorrido realizado, o realizando uno nuevo, registrando los consumos reales y simulando los resultados para ver si efectivamente coinciden para el ajuste realizado.

12.1.2. Exigencia a la batería y al motor

En la presente sección se evalúa cómo exige cada Ciclo de Conducción (WLTP, NEDC y Montevideo) al motor y la batería del vehículo. Se aprovecha la oportunidad para evaluar también la comparativa de agregar una pendiente constante a los Ciclos Internacionales y consideararla o no para el Ciclo Montevideo. A los Ciclos WLTP y NEDC se les incorpora una pendiente de 0,2243° (como en 12.1.1). Al Montevideo su perfil de inclinación particular. Para el estudio se le dará relevancia a dos parámetros, la potencia y el par entregados en el eje del motor.

Se escoge un único vehículo para realizar las simulaciones, en este caso se evaluará en la Renault Kangoo.



12.1. Comparativa de ciclos de conducción e influencia de la pendiente

Figura 12.1: Potencia entregada por la batería - Renault Kangoo - Ciclo NEDC con y sin pendiente

En las figuras 12.1 y 12.2, se observa cómo exige el Ciclo NEDC sin pendiente agregada al Kangoo. Particularmente la figura 12.1 muestra la potencia que se debe suministrar en el eje y la 12.2 el torque que debe entregar el motor para satisfacer el perfil de velocidades del ciclo. Cabe destacar que la potencia entregada por la batería difiere de la mecánica, ya que incluye en su cálculo las pérdidas tanto eléctricas como mecánicas incorporadas en el modelo y la potencia de servicios auxiliares del vehículo. En la figura 12.3 se observa la diferencia entre la potencia entregada por la batería y la potencia mecánica entregada al eje del vehículo.



Figura 12.2: Torque en el motor con Ciclo NEDC con y sin pendiente - Renault Kangoo

Capítulo 12. Estudios realizados

Para ponderar la exigencia del vehículo según cada ciclo de conducción se decidió calcular el promedio del valor absoluto del torque y de la potencia en el motor. En las figuras 12.2, 12.1, 12.3 y 12.4, se marcan con una línea horizontal los promedios del valor absoluto de las variables estudiadas. Se optó por este promedio, ya que los valores máximos y mínimos para el ciclo Montevideo tienen algunos "saltos". Estos saltos son ocasionados por errores en el muestreado del perfil de velocidad, para el que se utilizó una aplicación (ver sección 10.4). Cuando se encuentra un salto de velocidades en el perfil (por ejemplo al pasar de 0 km/h a 20 km/h) de un segundo al siguiente, el controlador, por su componente proporcional (kp) responde intentando acelerar al máximo. Al intentar esta aceleración se dan los saltos que se observan en la figura 12.4 (se observan 4 picos hasta el torque máximo para el Ciclo Montevideo sin pendiente, en rojo). Entonces no se consideró representativo



Figura 12.3: Comparación de potencia motor vs batería - Renault Kangoo



Figura 12.4: Torque en el motor con Ciclo NEDC con y sin pendiente - Renault Kangoo

192

12.1. Comparativa de ciclos de conducción e influencia de la pendiente

En la tabla 12.5 se despliegan los valores que se considera determinan la exigencia del ciclo al motor de la Renault Kangoo.

Caractorística	Valor	NEDC		WLTP		Montevideo	
Característica	Valor	s / pend	c / pend	s / pend	c / pend	s / pend	c / pend
Torque (Nm)	Promedio (val. absoluto)	12.18	15.15	15.29	17.98	19.50	24.82
Potencia batería (kW)	Promedio (val. absoluto)	5.03	6.18	7.64	8.80	5.39	6.36
Energía consumida (kWh)	Val. final	1.43	1.77	3.45	4.00	6.49	8.28
Distancia recorrida (km)	Val. final	10.93	10.93	23.26	23.26	42.33	42.33
Rendimiento (kWh/km)	Calculado	0.13	0.16	0.15	0.17	0.15	0.20

Tabla 12.5: Exigencia del vehículo en consumo, kilometraje, torque y potencia (en promedio del valor absoluto) del motor.

Realizando una comparativa simple entre los resultados mostrados para cada ciclo en la tabla 12.5, se aprecia que al agregar pendiente al WLTP y al NEDC aumenta la exigencia. Para el NEDC, en promedio del valor absoluto del torque y de la potencia, al agregar pendiente, se aumenta un 24.4 % y un 22.9 % respectivamente. Para el WLTP un 17.6 % y un 15.2 %. Para el Montevideo, el aumento al considerar la pendiente en torque y potencia es de un 27.3 % y un 18.0 % respectivamente.

La exigencia se nota claramente en el cambio de rendimiento, mostrado también en la tabla 12.5, donde para los tres ciclos, al agregar la pendiente, aumenta el consumo por kilómetro recorrido. Es interesante observar como el WLTP sin pendiente y el Montevideo sin pendiente tienen el mismo rendimiento en kWh/km (para la Kangoo). Esto implica que los perfiles de velocidad generan en el vehículo trabajado un perfil de consumo similar. Al comparar los mencionados rendimientos con el obtenido para el Montevideo con pendiente se encuentra que el efecto de considerar la misma genera un incremento de consumo de un 33.3 %, por lo que no puede considerarse despreciable.

Es razonable que el torque sea mayor para los ciclos con pendiente implementada, ya que para lograr la misma aceleración se necesitará compensar el componente del peso que aparece en las fuerzas que actúan sobre el vehículo con la pendiente (ver la ecuación 7.22).

12.2. Comparativa de rendimientos con Ciclo Montevideo

En la presente sección se pretende analizar el rendimiento de los distintos vehículos con el ciclo Montevideo y compararlo con los ciclos internacionales. Se considera interesante evaluar también el consumo de energía luego de realizado el recorrido, y el SOC remanente luego del mismo. En el contraste de los datos de la energía consumida y del estado de carga permitirá apreciar que tan bien aproxima el SOC el modelo a partir de la energía consumida.

En la tabla 12.6 se muestran los rendimientos de cada vehículo en kWh/km para los ciclos de conducción internacionales (NEDC y WLTP), el rendimiento para el ciclo Montevideo simulado y la energía utilizable en cada vehículo.

Vehículo	Renault Kangoo	Renault Zoe	BYD E6	Volkswagen E-Up!	Nissan Leaf
Rendimiento					
calculado ciclo	0.129	0.102	0.190	0.100	0.110
NEDC (kWh/km)					
Rendimiento					
calculado ciclo	_	0.137		0.119	
WLTP (kWh/km)					
Rendimiento					
simulado ciclo	0.196	0.159	0.261	0.207	0.193
Montevideo (kWh/km)					
Energía					
utilizable	22	41	57	16	22
(kWh)					

Tabla 12.6: Rendimientos en kWh/km según ciclos NEDC, WLTP y Montevideo.

Los valores de "Rendimiento calculado ciclo..." (para NEDC y WLTP), mostrados en la tabla 12.6, se obtienen a partir del cociente entre la autonomía de cada vehículo indicada por el fabricante (según tabla 11.1) y la energía utilizable de cada vehículo. Para el ciclo Montevideo en cambio, el rendimiento obtenido surge de realizar el cociente entre la autonomía obtenida mediante simulación para el ciclo completo Montevideo y la energía utilizable.

Realizando un ciclo Montevideo completo se obtienen las curvas de estado de carga (SOC), y de energía consumida (kWh) en función del tiempo que se muestran en las figuras 12.5 y 12.6 respectivamente.





Figura 12.5: Estado de carga en función del tiempo, considerando el ciclo Montevideo. Se muestra el comportamiento para todos los vehículos estudiados. El vehículo indicado con "Kangoo" se refiere a la Renault Kangoo de 22 kWh.

La tabla 12.7 muestra los valores finales del estado de carga (en %) y la energía consumida (kWh) al simular un ciclo completo Montevideo.



Figura 12.6: Energía consumida en función del tiempo, considerando el ciclo Montevideo. Se muestra el comportamiento para todos los vehículos estudiados. El vehículo indicado con "Kangoo" se refiere a la Renault Kangoo de 22 kWh.

Capítulo 12. Estudios realizados

Valor final	Nissan Leaf	Renault Kangoo	Renault Zoe	BYD E6	VW E-Up!
SOC final (%)	63.5	62.4	83.5	80.7	45.6
Energía cons. (kWh)	8.0	8.3	6.8	11.0	8.7

Tabla 12.7: Energía consumida (kWh) y Valores finales de SOC (%) para el ciclo Montevideo.

12.2.1. Análisis del rendimiento y la energía consumida para los vehículos.

Para todos los vehículos (ver tabla 12.6) se obtienen diferentes rendimientos en kWh/km (ya sean los calculados o los simulados). Esto es debido a varios factores. De vehículo a vehículo puede variar la química de las baterías, el número de celdas en serie y paralelo, la tensión, la corriente nominal, la eficiencia, las temperaturas de funcionamiento y para el mismo ciclo pueden dar lugar al paso de diferentes valores de corriente. Los ejes y acoples mecánicos tendrán sus propiedades características, lo que lleva a distintos valores de rendimiento. Varían los sistemas y la eficiencia de los convertidores de electrónica de potencia, que afectarán al rendimiento global del mismo. Varían las tecnologías y los tamaños de los motores, así las curvas de eficiencia y el rendimiento. La masa total también tendrá peso en las ecuaciones. En base a estas variables, cada vehículo tendrá un rendimiento en kWh/km para cada ciclo, que hablará de la respuesta del mismo ante las exigencias que pongan el camino y el conductor.

Para el modelo implementado, luego de ajustados los parámetros que determinarán el consumo de los vehículos como fue explicado en el capítulo 11, queda determinada la respuesta que tendrá cada vehículo ante los perfiles de velocidad y pendiente que tenga el ciclo de conducción y con esto, los perfiles del rendimiento en kWh/km.

Es sencillo ver, en la tabla 12.6, como el rendimiento calculado a partir de los datos del fabricante difiere del rendimiento obtenido de las simulaciones con el ciclo Montevideo. Para el caso de la Kangoo, el error entre NEDC y Montevideo es de un -34 %, para el Zoe un -35 %, para el E6 -27 %, para el E-up! -51 % y para el Leaf -43 %. En todos los casos la diferencia es superior al 25 % entre el ciclo Montevideo y el ciclo NEDC. Para el ciclo WLTP, la diferencia con el Montevideo está dada para el Zoe y el E-up!, siendo de -14 % y de -43 % respectivamente. En ambos casos baja respecto a la diferencia entre Montevideo y NEDC, pero es aún una distancia muy elevada como para considerar que el vehículo tendrá un rendimiento similar. Para el caso del Renault Zoe, la distancia entre el ciclo WLTP y el ciclo Montevideo es la más razonable, aunque un 14 % sigue siendo una distancia amplia con el recorrido real simulado.

El caso del VW-Eup! es el que marca una mayor distancia entre lo simulado para el ciclo Montevideo y los ciclos internacionales. En secciones anteriores ya se había analizado el contraste entre la autonomía de los ciclos internacionales y el ciclo Montevideo.

Según los ciclos WLTP y NEDC, el vehículo con mayor rendimiento es el Volkswagen E-Up!, luego le siguen el Renault Zoe, Nissan Leaf, Renault Kangoo y por último el BYD E6.

12.2. Comparativa de rendimientos con Ciclo Montevideo

Para el ciclo Montevideo simulado, a excepción del Volkswagen E-Up!, se mantiene el orden en cuanto a los rendimientos obtenidos, comenzando con el Renault Zoe, luego Nissan Leaf, Renault Kangoo, Volkswagen E-Up! y finalmente el BYD E6. Esto también se ve en la gráfica 12.6, donde se mantiene la tendencia del rendimiento (salvo para el E-Up!).

De la figura 12.6, al comparar las tendencias de consumo de energía, se observa que la distancia en energía consumida entre gráficos aumenta con el incremento de la pendiente. Claramente, esto se corresponde con la exigencia en potencia de cada vehículo según el trayecto. Cabe recordar que la pendiente del gráfico de energía en función del tiempo es la potencia instantánea. Por ejemplo en los alrededores de t=500 s, se observa que el BYD E6 comienza a consumir más energía que el Renault Zoe y las gráficas se despegan. Esto se debe a que en ese momento, y según el modelo, demanda mayor potencia ante la exigencia del terreno o el conductor, por lo cuál se exige más al vehículo de forma global. En ese momento comienzan a tener mayor peso las pérdidas (que en el modelo son función de la corriente demandada, del torque y de la velocidad del motor).

12.2.2. Análisis del estado de carga final para el ciclo Montevideo en todos los vehículos.

Se analiza el estado de carga final luego de simulado el ciclo Montevideo para cada vehículo, con el fin de validar el algoritmo del SOC implementado.

• Renault Kangoo:

La energía máxima utilizable es 22kWh. En el recorrido en Montevideo se consumen 8.3 kWh, lo que equivaldría a un 37.7% de la energía total. Por lo tanto el SOC remanente debería ser 62.3%. En la tabla 10.9 se tiene un valor de 62.4%.

Renault Zoe:

La energía máxima utilizable es de 41 kWh. Se utilizaron 6.8 kWh, lo que equivale a un 16.6 % de la energía total. Por lo tanto el SOC remanente debería ser de un 83.4 %, y en la simulación es de un 83.5 % (ver tabla 10.9).

• BYD E6:

La energía máxima utilizable es de 57kWh, y en el recorrido en Montevideo se utilizaron 11.0 kWh, lo que equivale a un 19.3% de la energía total. Por lo tanto el SOC remanente debería ser 80.7%, y en la simulación resulta en un 80.7% (ver tabla 10.9).

• Volkswagen E-Up!:

La energía máxima utilizable es de 16 kWh, y en el recorrido en Montevideo se utilizaron 8.7 kWh, lo que equivale a un 54.4% de la energía total. Por lo tanto el SOC remanente debería ser un 45.6%, valor que se obtiene en la simulación (ver tabla 10.9).

Capítulo 12. Estudios realizados

• Nissan Leaf:

La energía máxima utilizable es 22 kWh. En el recorrido en Montevideo se utilizaron 8.0 kWh, lo que equivale a un 36.4% de la energía total. Por lo tanto el SOC remanente sería de 63.6%, y en la simulación da 63.5% (ver tabla 10.9).

Con los resultados obtenidos se concluye que el modelo es consistente en cuanto a la estimación del estado de carga de cada vehículo en base a la energía consumida.

12.3. Evaluación del ciclo Estándar diario

En esta sección se propone estudiar un recorrido "estandar" en ciudad. Se intenta generar un recorrido que sea representativo del uso diario de un vehículo en Montevideo.

Propone también analizar, en base al ciclo Estándar diseñado, mediante el algoritmo del SOH implementado, el impacto del uso en la vida útil del mismo. Se analizará el impacto de distintas costumbres de uso del vehículo en cuanto a gestión de la energía remanente y de la carga.

En general, para vehículos livianos de uso personal, un usuario promedio realiza entre 1.000 km y 1.250 km por mes [52] [86].

Para hallar los km recorridos por día, se considera que el usuario utiliza el vehículo para hacer el mismo recorrido durante 5 días de la semana (ir a trabajar, ir a centros educativos u otros) y los fines de semana realiza recorridos de menor porte. Se considera entonces que entre los dos días del fin de semana el usuario realiza el mismo kilometraje que un día entre semana, por lo que al mes, es como si el usuario utilizara el vehículo durante 24 días con ese recorrido Estándar.

si el usuario utilizara el vehículo durante 24 días con ese recorrido Estándar. Es entonces que el uso diario del vehículo se estima entre $\frac{1000}{24}$ km/día=41,7

 $km/día y \frac{1250}{24} km/día=52,1 km/día.$

Considerando que Montevideo es una ciudad que concentra la mayoría de la población del país, se opta por acercarse al límite inferior del kilometraje recorrido por día. Las personas que residan en ciudades del interior del país seguramente recorran aún menos kilometraje.

12.3.1. Estudio del ciclo Estándar

En base a lo explicitado y utilizando los cinco recorridos reales que se tienen a disposición, mencionados en el capítulo 10.2, se construye el "Ciclo Estándar".

Recordando los recorridos mencionados en el capítulo 10.2, y repasando las distancias recorridas en cada ciclo se tiene:

- Recorrido 1 "UTE Cerro" 9.0 km
- Recorrido 2 "Cerro Facultad de Ingeniería" 17.8 km
- Recorrido 3 "Facultad de Ingeniería Mdeo Shopping" 4.7 km
- Recorrido 4 "Mdeo Shopping Ciudad Vieja" 6.6 km
- Recorrido 5 "Ciudad Vieja UTE" 4.1 km

Se considera prudente suponer que un usuario al comenzar al día lleva algún familiar/allegado a su trabajo, o centro educativo. Se asume que recorre aproximadamente 4.1 km (distancia que recorre el recorrido 5). Se suman entonces dos de estos ciclos asumiendo que vuelve a su hogar o se desvía la misma distancia para luego ir luego a su trabajo. A continuación recorre aproximadamente 6.6 km, hacia su trabajo, distancia que realiza el recorrido 4. Se suma dos veces este recorrido

Capítulo 12. Estudios realizados

asumiendo que vuelve a su hogar luego de la jornada laboral. Se suman nuevamente "Ciudad Vieja - UTE", de 4.1 km para ir a buscar las personas que transportó más temprano. Aparte de las obligaciones diarias, se asume un recorrido más que puede realizar por ocio, para realizar las compras, u otras actividades, entonces se suma dos veces el recorrido 3, de 4.7 km. Repasando la construcción del ciclo se tienen:

- Dos recorridos $5 \rightarrow 2 \cdot (4,1)$ km
- Dos recorridos $4 \rightarrow 2 \cdot (6,6) \text{ km}$
- Dos recorridos $5 \rightarrow 2 \cdot (4,1) \text{ km}$
- Dos recorridos $3 \rightarrow 2 \cdot (4,7)$ km
- Recorrido total: 39 km

De este modo se logra un recorrido con perfil de velocidades y pendientes reales, que podría llegar a utilizar un usuario tipo. Notar que el valor total de km del ciclo Estándar se acerca al valor buscado de 41.7 km/día, por lo que es una buena representación en cuanto a km recorridos.

Se presenta el perfil de velocidades del Ciclo Estándar en la figura 12.7.



Figura 12.7: Ciclo Estándar implementado

El ciclo implementado tiene una duración de 6089 s, y recorre (integrando el perfil de velocidades), 39.3 km.

Para realizar el estudio de la presente sección se decidió agregar el vehículo Renault Kangoo ZE Maxi, de 33 kWh de energía, cuya batería es de NMC. La razón principal por la que se incorpora es por la química de su batería, dado que el algoritmo del SOH aplicado en la presente documentación es para baterías de este tipo.

Para una rápida introducción al vehículo, intentando balancear la información que se había brindado para los restantes, se incorpora la tabla 12.8.

Renault Kangoo ZE Maxi 33 kWh							
Ciclo	Autonomía declarada (km)	Autonomía simulada (km)	Ciclos al 80 % del SOH	Vida útil (km)	Garatía (km)		
NEDC	270.0	270.8	1664	450 610	100 000 [87]		
WLTP	-	241.1	1682	405 530	100 000 [87]		
Montevideo	-	169.4	1674	283 580	100 000 [87]		
Estándar	-	160.0	1670	267 200	100 000 [87]		

Tabla 12.8: Autonomías y ciclado para la Kangoo ZE Maxi de 33 kWh

Cabe destacar, de la tabla 12.8 que el vehículo no cuenta con autonomía bajo el ciclo WLTP testeada por el fabricante, motivo por el cual no se indica en dicha tabla. Además la Renault Kangoo 33 kWh cumplirá, según los datos simulados, ampliamente con la garantía que declara el fabricante. Se puede apreciar también que el Ciclo Estándar es el más exigente de los implementados.

Se utilizarán también en esta sección los restantes vehículos que tienen baterías con química NMC. Por lo tanto, los estudios se realizarán con el Renault Kangoo ZE de 33kWh, el Volkswagen E-up! y el Renault Zoe ZE.

Previo a entrar en el análisis, cabe recordar que el algoritmo de SOH, explicado en el capítulo 7.4, considera la descarga realizada y una luego una carga a un octavo del *Crate* de la batería $(\frac{C}{8})$, es decir una carga de *Crate* = 0,125*C*, lo cual implica una carga total en 8 horas.

12.3.2. Evaluación del Ciclo Estándar

A continuación se evalúa el efecto en la batería de realizar el ciclo Estándar tal como fuera definido anteriormente.

Se simula el hecho de realizar una vez el recorrido del ciclo Estándar para cada vehículo (que cuentan con baterías de NMC), comenzando con su batería cargada al 100 %.

En función de dicha simulación se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 12.9.

Vehículo	SOC final (%)	\mathbf{n}° ciclos	Vida útil (km)
Renault Zoe	84.78	24 519	962 371
VW E-Up!	50.99	4 421	173 524
Renault Kangoo 33	75.01	15 111	$593\ 107$

Tabla 12.9: Resultados luego de realizar un ciclo Estándar.

Capítulo 12. Estudios realizados

Se pueden apreciar los valores obtenidos de SOC final durante el recorrido de un ciclo Estándar. También se muestra el n° ciclos que se pueden realizar hasta que la capacidad de la batería se reduzca a un 80 % de su valor inicial. Además hay que recordar que un "ciclo" representa una descarga (que corresponde al andamiento del vehículo con las características del recorrido elegido) y una posterior carga completa a un *Crate* de 0.125C.

Por último, los valores indicados en la columna "Vida útil en km" representan el kilometraje que el vehículo es capaz de realizar durante toda su vida útil si se lo utiliza siempre para realizar el recorrido Estándar comenzando desde el 100 % del SOC y finalizando con el SOC de la tabla 12.9. El valor se halla realizando el producto del n° ciclos por los km que se realizan en un ciclo Estándar.

Más allá de la vida útil en kilómetros, es importante comparar los vehículos y notar por qué se obtienen los resultados anteriores.

Evaluando el n° de ciclos, se tiene que el Renault Zoe es capaz de soportar un uso durante 5.55 veces más que el VW E-Up! y 1.62 veces más que la Kangoo de 33 kWh. A su vez la vida útil de la Kangoo es 3.24 veces más que el E-Up!.

Lo descripto en el párrafo anterior se explica mediante el algoritmo del SOH. La profundidad de descarga (DOD) que se le realiza a la batería juega un rol preponderante, ya que el SOH disminuye rápidamente con el aumento del DOD (ver gráfico 7.18 en la sección 7.4.4). Como el Renault Zoe es el que tiene mayor capacidad de almacenamiento de energía, es el que impone un menor DOD para completar el ciclo Estándar. Además el Renault Zoe es el que tiene mayor rendimiento en kWh por cada km utilizado para este ciclo (ver 12.6), lo cual también aporta a que se disminuya el DOD.

Análogamente, el Volkswagen E-UP! es el que tiene menor capacidad de energía entre los tres autos comparados, y menor rendimiento en kWh/km para el ciclo en cuestión, por lo cual, es el que necesita utilizar mayor DOD para completar el ciclo Estándar, y por ello es que la cantidad de ciclos que es capaz de realizar hasta el 80 % de su vida útil es menor en comparación al Renault Zoe o a la Renault Kangoo de 33 kWh.

Lo anteriormente expuesto se puede apreciar en los siguientes gráficos, en donde se muestra como es afectado el estado de salud de la batería cuando la misma es descargada con distintos DOD. En particular se grafican los casos de descarga para $DOD_1 = 20\%$ y $DOD_2 = 40\%$.
12.3. Evaluación del ciclo Estándar diario



Figura 12.8: Estado de salud en función del Crate

Para realizar el gráfico anterior debemos fijar la temperatura (T= 35° C) y elegir el n° de ciclos que deseamos evaluar.

Cada vehículo utiliza diferentes Crates en cada instante del ciclo debido a que tienen diferentes capacidades (en Ah) en sus baterías. Igualmente los valores de Crate promedio en el ciclo Estándar (al igual que en la mayoría de los ciclos simulados) se encuentran entre 0.1C y 0.4C. Esto es relevante ya que entonces tenemos que evaluar el comportamiento dentro de este rango de Crates.

Si realizamos un acercamiento, podemos ver señalados varios puntos de interés y sus valores correspondientes.

Capítulo 12. Estudios realizados



Figura 12.9: Estado de salud en función del Crate

En el gráfico12.9 se puede observar el peso del DOD y del Crate en el estado de salud.

Si por ejemplo observamos el efecto de duplicar el Crate (pasando de 0.15C a 0.3C), el SOH varía en valores de 0.1% y 0.3% (para el caso de $DOD_1 = 20\%$ y $DOD_2 = 40\%$ respectivamente).

Sin embargo si duplicamos el DOD (pasando de un $DOD_1 = 20\%$ a un $DOD_2 = 40\%$) observamos que el SOH se afecta un 10.5 % y 10.3 % (para Crate 0.15C y 0.3C respectivamente).

Por lo que el efecto del DOD es mucho mayor que el del Crate (para valores de Crate menores a 0.5C).

Esto hace que sea de gran importancia conocer este efecto ya que puede ser utilizado para implementar o mejorar prácticas de uso habituales en vehículos eléctricos.

12.3.3. Gestión de la carga de batería

Además de tener un recorrido Estándar y evaluar su funcionamiento con cada vehículo, es interesante evaluar cuándo es conveniente cargar el vehículo. Esto es con el fin de prolongar la vida útil de la batería.

Un usuario de vehículos eléctricos podría preguntarse qué opción es más ventajosa; si cargar el vehículo cada vez que pueda o gastar toda su batería en sucesivos

12.3. Evaluación del ciclo Estándar diario

ciclos y luego cargarlo por completo.

Para evaluar esto se simulan otros casos de estudio. El caso indicado en la tabla 12.10 corresponde a realizar dos corridas de ciclo Estándar seguidas, comenzando con el vehículo cargado al 100 %. Este caso corresponde a realizar un recorrido Estándar por día, pero la carga se realiza cada dos días. Mientras que en la tabla 12.11 se muestran los resultados de realizar tres corridas de ciclo Estándar, comenzando desde un SOC de 100 %. Este caso equivale a realizar la carga cada tres días.

Para realizar estas simulaciones de varios ciclos concatenados, se utiliza la opción de la interfaz gráfica "anidar ciclos".

Vehículo	Recorrido (km)	SOC final (%)	\mathbf{n}° ciclos	Vida útil en km
Renault Zoe	78.6	69.56	8553	672 266
VW E-Up!	78.6	1.98	1762	138 493
Renault Kangoo 33	78.6	50.02	4283	336 644

Tabla 12.10: Resultados de realizar un ciclo Estándar por día, cargando la batería cada 2 días.

Vehículo	Recorrido (km)	SOC final (%)	\mathbf{n}° ciclos	Vida útil en km
Renault Zoe	117.9	54.34	4605	542 929
Renault Kangoo 33	117.9	25.03	2370	279 423

Tabla 12.11: Resultados de realizar un ciclo Estándar por día, cargando la batería cada 3 días.

En las tablas anteriores se muestran los valores de km recorridos, SOC final y el n° ciclos (obtenido mediante algoritmo del SOH). En este caso de estudio, cada "n° ciclo" representa dos descargas del ciclo Estándar y una posterior carga a 0.125C (C/8).

Los valores indicados en la columna "Vida útil en km" representan el kilometraje que el vehículo es capaz de realizar si siempre se lo utiliza bajo estas condiciones.

Observando los resultados de la tabla 12.10 y comparando con el caso de realizar un ciclo Estándar (con su correspondiente carga) por día (ver valores obtenidos en la tabla 12.9) se puede observar que evaluando la vida útil en km, los rendimientos cambian en forma notable.

En el caso del Renault Zoe la diferencia de cargar el vehículo cada dos días o cada uno se traduce en un 43 % más de vida útil cuando se carga cada día. Para el VW E-Up!, se mantiene la tendencia anterior, en este caso la vida útil en km aumenta un 25 % más. Por último en la Renault Kangoo 33 kWh se obtienen los rendimientos más amplios, en donde la vida útil aumenta un 76 % más al cargar el vehículo cada día.

Capítulo 12. Estudios realizados

Lo anterior marca que sin importar el vehículo, es preferible optar por cargar el vehículo cada día en vez de cargarlo cada dos días. El caso de cargar el vehículo cada tres días (resultados en tabla 12.11) llevará al mismo resultado; es conveniente cargar el vehículo cada un día en vez de cada tres días.

Los resultados anteriores están directamente ligados a la profundidad de descarga (DOD) con que se realiza cada caso de estudio. Ver que para este caso de realizar dos descargas seguidas y luego cargar, el Renault Zoe tiene un DOD del 30.44 %, en el VW E-Up! un DOD de 98.02 % y en el caso de la Renault Kangoo 33 kWh se tiene un DOD de 49.98 %. Por lo tanto es correcto ver que el peor caso en cuanto a ciclos de vida corresponde con el vehículo que se afecte con mayor DOD, en este caso el E-Up!. El análisis realizado previamente en la sección 12.9 analiza también el impacto del DOD en la vida útil de las baterías.

En base a lo anterior y realizando un pensamiento análogo, se puede ver que se obtendrá un mejor rendimiento del vehículo (en cuanto a la vida útil de las baterías) si se carga el vehículo cada vez que se pueda (por ejemplo al llegar al trabajo o lugar de estudio) de manera que en el recorrido realizado, siempre estemos trabajando con bajas profundidades de descarga. En la sección 12.3.5 se analizará como extender la vida útil de la batería en función del % de SOC que se tenga para iguales DOD.

12.3.4. Estudio con ciclo Estándar y descarga V2G

La proliferación del mercado de los vehículos eléctricos hace pensar que se pueda considerar cada vehículo como un acumulador de energía. Este acumulador será una herramienta para gestionar el consumo de las cargas propias. Si bien al día de hoy no está regulado el intercambio de energía con la red eléctrica de la utility local desde vehículos con baterías, es muy probable que a futuro puedan existir este tipo de "micro generadores".

En la presente sección se estudiará la influencia de descargar energía a la red (V2G) o al hogar. Se realizará un recorrido Estándar y posteriormente se entregará la energía remanente en la batería a la red.

Se evaluará la conveniencia de realizar V2G, desde un punto de vista de gestión e impacto sobre la batería. Un análisis económico que incluye los resultados vertidos en esta sección se realiza luego en el punto 13.3.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones, en donde se realiza un recorrido Estándar y luego se entrega el resto de la energía a la red eléctrica de la empresa distribuidora.

12.3. Evaluación del ciclo Estándar diario

Vehículo	SOC inicial de V2G (%)	Energía V2G (kWh)	\mathbf{n}° ciclos	Vida útil (años)
Renault Zoe	84.78	30.66	1839	5.04
VW E-Up!	51.00	6.56	1878	5.15
Renault Kangoo 33	75.01	20.15	1853	5.08

Tabla 12.12: Resultados de realizar un ciclo Estándar y entregar la energía remanente a la red.

Se puede apreciar en la tabla 12.12 el efecto de descargar a la red la energía remanente en cada vehículo para el ciclo Estándar.

En todos los vehículos se comienza con un estado de carga inicial del 100%, luego se realiza el ciclo Estándar y por último se vuelca la energía remanente hasta que el SOC final en la batería sea del 10%. En todos los casos se deja fijo el valor final del estado de carga ($SOC_{final} = 10\%$). Esto está relacionado con la forma en que está diseñado el modelo de descarga a la red; siempre se quiere dejar una reserva de carga en el vehículo por si surge alguna "emergencia" y es necesario utilizar el vehículo en estas situaciones.

A partir de los valores recabados en la columna "n° ciclos" de la tabla 12.12, se obtiene la vida útil en años considerando que se realiza uno de estos "ciclos" por día.

Se observa que independientemente del vehículo, los resultados en cuanto a los años que se puede mantener este comportamiento con la batería son similares.

Con este tipo de comportamiento, en cada vehículo se realizará la misma profundidad de descarga (DOD = 100% - 10% = 90%), por lo cual en este caso el DOD no afectará a la estimación del estado de salud.

Lo que afecta es que cada vehículo tiene distintos Crates a los que realiza la descarga (tanto la descarga en el recorrido como la descarga a la red), siendo el E-Up! el vehículo con mayores Crates (0.3C en promedio). Para el Zoe el valor promedio de Crate para toda la descarga es 0.15C, mientras que para la Kangoo 33 kWh el valor promedio de Crate es de 0.18C. Con estos datos y teniendo en cuenta la curva de estado de salud en función de Crate (recordar la figura 7.20, del capítulo 7.4) se puede deducir que para valores menores a 0.5C (aproximadamente) a mayor Crates tendremos estados de salud levemente mayores.

En cuanto al rendimiento de la batería, es notorio que su vida útil se reduce considerablemente frente al caso de no descargar a la red. Si lo comparamos con el caso en que solamente se realiza un ciclo Estándar y luego carga la batería (ver resultados en 12.9), el hecho de descargar a la red impactará en la vida útil, siendo para el caso del Zoe aproximadamente 13 veces mayor el kilometraje que podremos recorrer si no descargamos a la red. En el caso de la Kangoo 33kWh podremos recorrer 8 veces más y con el VE E-Up! tendremos un rendimiento aproximadamente 2 veces superior.

Capítulo 12. Estudios realizados

Como se puede notar con los datos previamente expuestos, descargar la energía a la red no termina de ser beneficioso desde el punto de vista de la batería ya que se ve muy afectado su estado de salud. Sin embargo para poder decidir completamente, debemos tener en cuenta el factor económico, cuyo desarrollo se estudia en la sección 13.3.

12.3.5. Optimización de uso según vida útil de la batería

En esta sección se analizan distintas formas de uso de la batería con el fin de optimizar su vida útil.

Se estudia cómo varía el SOH simulando el ciclo Estándar, para cada uno de los vehículos con batería NMC, utilizando las mismas profundidades de descarga (DOD) pero con diferentes condiciones iniciales del estado de carga (SOC).

Vehículo	SOC inicial (%)	SOC final (%)	\mathbf{n}° ciclos	Rendimiento
	100	84.78	24 519	1.0
Renault Zoe	50	34.83	$74 \ 215$	3.0
	30	14.79	$156 \ 628$	6.4
	100	51.00	4 421	1.0
V W E-Up!	50	2.94	18 863	4.3
	100	75.01	15 111	1.0
Renault Kangoo 33	50	25.26	45 840	3.0
	30	5.67	76 867	5.1

Tabla 12.13: Cantidad de ciclos y rendimiento de la vida útil de la batería para cada vehículo según el SOC inicial con el que se comience para iguales DOD en el ciclo Estándar.

La tabla 12.13 muestra la cantidad de ciclos que es capaz de realizar cada vehículo para el mismo recorrido hasta que la capacidad de la batería llegue al 80% de su capacidad máxima. Se comienzan las simulaciones con estados de carga distintos (100%, 50% o 30%) y se simula el mismo ciclo Estándar en todos los casos.

Se aprecia, como fue comentado en la sección 7.4.4, que la cantidad de ciclos aumenta cuando utilizamos valores bajos de estado de carga inicial, a tal punto que para el caso del Renault Zoe, se puede extender la vida útil de la batería 6.4 veces si se comienza con un estado de carga del 30 % en vez de comenzar con 100 % para el ciclo de conducción Estándar.

Por lo tanto, en base a este análisis y a lo visto en la sección anterior (12.3.4), es de buena práctica cargar el auto lo suficiente como para realizar el ciclo de conducción deseado (utilizar bajo DOD) y a su vez utilizarlo con baja energía remanente (bajos SOC), para así extender la vida útil de la batería.

A continuación se procede a explicar este resultado desde su perspectiva química.

208

12.3. Evaluación del ciclo Estándar diario

Las baterías en cuestión son del tipo NMC (óxido de Litio Níquel Manganeso Cobalto). La disolución del manganeso que se encuentra en el electrodo positivo (cátodo) es una de las causas principales que produce el envejecimiento de la batería. Esto es debido a que, al estar en porcentajes de SOC altos, se tiene un mayor potencial, esto hace que se facilite la disolución del manganeso en el cátodo (un aumento en la temperatura también causa el mismo efecto). Este proceso hace que la disolución de Mn migre por el electrolito hacia el electrodo negativo (ánodo), y se deposite en la frontera entre el ánodo y el electrolito como se observa en la figura 12.10. Esto es conocido como SEI (Solid Electrolyte Interphase).



Figura 12.10: Efecto SEI (Solid electrolyte interphase). [88] Se observa como el cátodo pierde iones de Mn y van hacia la frontera del ánodo por el electrolito. En la frontera del ánodo y el electrolito se va formando el SEI, que luego corroe al grafito.

Al cabo del tiempo el SEI penetra los poros del grafito en el ánodo, esto resulta en una disminución del área de superficie activa del ánodo, y lleva a que aumente su resistencia interna.

Estos resultados hacen que se acelere el envejecimiento de la batería, ya que el cátodo pierde capacidad al perder parte del Mn y el ánodo aumenta su resistencia interna debido a la penetración de iones de Mn en los poros del grafito.

Por lo tanto, utilizar la batería en % de SOC elevados, aumenta más la pérdida de capacidad en el cátodo y la resistencia interna del ánodo, en comparación si la batería se utilizase en % de SOC bajos [89].

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 13

Rentabilidad económica

Una persona con la necesidad de adquirir un vehículo eléctrico, o una flota de ellos, evaluará la conveniencia en sus prestaciones y el costo que le implicará su adquisición, mantenimiento y circulación del mismo. La evaluación del costo beneficio que obtendrá de dicha compra, será lo que lo impulse a tomar la decisión final.

En la presente sección se realizará una comparación de costos iniciales en la adquisición de un vehículo eléctrico contra un vehículo a combustión interna de similares prestaciones.

Se trazarán ecuaciones que permitirán estudiar cómo se puede recuperar la diferencia de la inversión inicial. Las mismas incluirán la diferencia en el costo en energía que impulsa a los vehículos, el mantenimiento, así como variantes que podrán amortizar la inversión inicial (como la inclusión del V2G).

Se comentará el contexto tarifario y de costos de energía en Uruguay. Esto es necesario para realizar la comparación los costos de la energía consumida y para incluir ecuaciones de gestión de demanda del hogar con el uso de la batería del vehículo.

Finalmente, se obtendrán los tiempos de repago de la diferencia en la adquisición de un VE contra un ICE, discriminando por casos de tipo de uso diario del vehículo, por kilometraje recorrido y por la gestión de su batería contra la red o el hogar.

13.1. Costos de la energía

Se desglosará en dos sub-secciones, en la primera (13.1.1) se exponen los cargos por energía de las tarifas disponibles en la actualidad que se consideran más convenientes para realizar la gestión del vehículo. En la segunda (13.1.2), se exponen los costos de los combustibles derivados del petróleo (particularmente gasolina), impuestos por ANCAP (Administración Nacional de Combustibles Alcohol y Pórtland).

13.1.1. Tarifas de energía eléctrica

Para clientes residenciales de UTE se plantean dos tarifas que diferencian los cargos por energía consumida según el horario.

La "Tarifa Residencial Triple Horario" [90](TRTH) es una de las alternativas que plantea UTE para clientes residenciales con potencia contratada entre 3,7 kW y 40 kW. Los cargos por energía se distribuyen en tres períodos horarios, durante todos los días que integran la factura mensual, de acuerdo al siguiente detalle:

- Horas **Punta**: de 17:00 a 23:00 horas (en total 6 horas de Punta).
- Horas Llano: de 07:00 a 17:00 y de 23:00 a 24:00 horas (11 horas de Llano).
- Horas Valle: de 00:00 a 07:00 horas (7 horas de Valle).

El cargo por consumo de energía, según los períodos horarios son:

- **Punta**: 8.623 $\frac{\$}{kWh}$.
- Llano: 4.676 $\frac{\$}{kWh}$.
- Valle: 1.803 $\frac{\$}{kWh}$.

La "Tarifa Residencial Doble Horario" [90] (TRDH) se presenta como la segunda alternativa. Está disponible para clientes residenciales cuya potencia contratada esté entre 3,3 kW y 40 kW. Los cargos por energía se distribuyen en dos períodos horarios, durante todos los días que integran la factura mensual, de acuerdo al siguiente detalle:

- Horas **Punta**: de 17:00 a 23:00 horas (6 horas de punta).
- Horas Fuera de Punta: de 00:00 a 17:00 y de 23:00 a 24:00 horas (18 horas fuera de punta).

El Cargo por consumo de energía es:

• **Punta**: 8.623
$$\frac{\$}{kWh}$$
.

• Fuera de Punta: 3.453
$$\frac{\$}{kWh}$$

UTE incorpora en su Pliego Tarifario una **"Tarifa de Movilidad Eléctrica"** [90] (TME), para la carga de energía a vehículos eléctricos en puestos de carga ubicados en la vía pública.

También es una tarifa horaria, y los períodos tienen el mismo nombre que en la TRTH, por lo que a continuación se detallan los horarios y costos establecidos para la misma, con el agregado de TME al nombre del período:

- Horas **PuntaTME**: de 18:00 a 22:00 horas.
- Horas LlanoTME: de 07:00 a 18:00 y de 22:00 a 24:00 horas.
- Horas ValleTME: de 00:00 a 07:00 horas.

El cargo por consumo de energía es:

- **PuntaTME**: 13.603 $\frac{\$}{kWh}$.
- LlanoTME: 5.207 $\frac{\$}{kWh}$.
- ValleTME: 2.8 $\frac{\$}{kWh}$.

En la página de Movilidad Eléctrica de UTE [91] se especifica que para usuarios de vehículos eléctricos, la TME en ValleTME tiene un 50 % de descuento en las estaciones de recarga de UTE. En la tarifa TRDH también se tiene el cargo por energía al 50 % en horario Fuera de Punta (fuera del tramo entre 06:00 a 22:00). Esto genera, para usuarios de VEs, los siguientes costos de la energía para los tramos ValleTME y Fuera de Punta de la TRDH:

- Costo ValleTME: $\frac{2.8}{2} \frac{\$}{kWh} = 1.4 \frac{\$}{kWh}$
- Costo **Fuera de Punta**(TRDH): $\frac{3,453}{2}\frac{\$}{kWh} = 1,7265\frac{\$}{kWh}$

Visto esto, se concluye que el costo mínimo del kWh para cargar un vehículo eléctrico es de $1.4\frac{\$}{kWh}$, utilizando los puestos de carga de UTE, en los períodos de ValleTME. En el hogar, lo más conveniente es contratar una TRDH y cargar el vehículo en Fuera de Punta a un cargo de $1.7265\frac{\$}{kWh}$.

Para los estudios realizados en este capítulo, se considerará la opción de la carga en el hogar, asumiendo que la mayoría de los usuarios residenciales preferirá cargar sus autos por la noche, en sus casas.

13.1.2. Costo de combustibles

En Uruguay, los costos del combustible son propuestos por la Administración Nacional de Combustibles Alcohol y Pórtland (ANCAP) [92] y fijados por el Poder Ejecutivo [93] [94].

ANCAP ofrece dos tipos de combustible que pueden utilizar los vehículos a los que se les dará estudio. La Gasolina Super 95 SP (de 95 Octanos RON), satisface requerimientos de los motores de combustión interna con exigencias antidetonantes medias y elevadas [94]. El segundo combustible es la Gasolina PREMIUM 97 SP (de 97 Octanos RON), apropiada para motores de última generación, de elevada relación de compresión con sistema de carburación o de inyección, de alta performance. Los costos de las mismas son [94]:

- **Gasolina Súper 95 SP:** \$ 54.95
- Gasolina PREMIUM 97 SP: \$ 57.01

Como en el caso de la tarifa eléctrica, se elegirá el costo más conveniente, siendo el mismo de \$ 54.95 para la Gasolina Super 95 SP.

13.2. Costos de un VE vs un ICE

Se compararán los costos de adquisición de los VEs que serán trabajados en esta sección, particularmente el Renault Kangoo ZE Maxi 33 y el Renault Zoe R110, contra coches de características similares a combustión interna.

Desafortunadamente, no se dispone de los precios para el Renault Zoe R110 en Uruguay. Es por esto que se estima el costo del mismo a partir del precio de la Renault Kangoo ZE Maxi en el país [52], y del dato del costo del mismo vehículo en los Países Bajos [95]. De esta forma, considerando la relación de precios, y conociendo los datos de costo en los Países Bajos para el Renault Zoe R110, se puede estimar el costo de este vehículo en Uruguay. En la tabla 13.1 se incluye el precio para la Kangoo ZE en Uruguay y el costo estimado del Zoe. A cada uno de los vehículos eléctricos se les buscó su correspondiente a combustión. Para la Kangoo, su homónima y para el Renault Zoe, el Renault Clio. Los precios de los mismos para el país se incluyen en la tabla (13.1).

Vehículo	Costo (US\$)	Diferencia (US\$)
Renault Kangoo ZE Maxi 33	38 990 [52]	23500
Renault Kangoo	$15 \ 490 \ [52]$	23300
Renault ZOE	$36\ 018\ [95]$	12028
Renault CLIO IV Expression 1.2	23 990 [96]	12028

Tabla 13.1: Comparativa en costo de adquisición de un VE vs un ICE en Uruguay (Renault Kangoo ZE vs Renault Kangoo y Renault Zoe vs Renault Clio)

En la tabla 13.1 se aprecian los costes de los VEs, de los ICEs, y la diferencia entre la adquisición de los mismos (VE vs ICE). Será necesario estudiar entonces de qué manera puede un VE volcar la balanza a su favor para lograr desquitar las diferencias económicas. En las secciones a continuación, se analizará cómo puede el eléctrico generar un ahorro que amortice la diferencia inicial de costos.

13.2.1. Costo de la energía consumida

Según lo especificado en las sub-secciones 13.1.1 y 13.1.2 del presente capítulo, se podrá especular con el gasto de combustible según el consumo del vehículo. Se considerará en el estudio de esta sección, para la medida de distancia recorrida y de energía consumida, el kilometraje realizado con el ciclo Estándar creado en la sección 12.3.1.

Para los vehículos de combustión interna se asumirá un rendimiento de 14 km/l[52]. Para los vehículos eléctricos, se tomarán los valores de consumo simulados al recorrer la cantidad de ciclos Estándar que correspondan a cada kilometraje a estudiar.

En la tabla 13.2 se muestra la "Energía diaria consumida (kWh)" simulada para los dos vehículos eléctricos trabajados en esta sección, el "Costo mensual equivalente en combustible (\$)" estimado para los vehículos a combustión (que rinden 14 km/l) al recorrer 39.3 km, 78.6 km, 117.9 km y 157.2 km (correspondientes a 1, 2, 3 y 4 ciclos Estándar), el "Cargo mensual por energía (\$)" según el kilometraje diario realizado y la "Diferencia mensual entre costos de energía VE vs ICE", que marca la diferencia económica mensual que tiene el realizar los recorridos en un VE y en un ICE. Los costos y cargos mensuales son calculados para 30 días al mes, considerando que el recorrido se hace a diario. Los precios de la energía (\$/l y \$/kWh) surgen de los cargos planteados en 13.1.1 y 13.1.2. Se toma el costo de la energía asociado a la tarifa Doble Horario Residencial en Fuera de Punta, con el descuento para clientes con VEs, por lo que, el cargo por energía eléctrica es de 1.7265 \$/kWh. Para el combustible, se considera el costo de la Gasolina Super, de 54.95 \$/l.

Vehículo	Distancia diaria (km)	Energía diaria consumida (kWh)	Costo mensual en combustible (\$)	Cargo mensual por energía (\$)	Diferencia mensual entre costos de energía VE vs ICE (\$)
	39.3	7.6	4615.8	393.6	4222.2
Bonault Kangoo	78.6	14.1	9231.6	730.3	8501.3
Reliault Kangoo	117.9	22.7	13847.4	1175.7	12671.7
	157.2	30.6	18463.2	1584.9	16878.3
	39.3	6.2	4615.8	321.1	4294.7
Popoult 700	78.6	12.5	9231.6	647.4	8584.2
Renault 20e	117.9	18.7	13847.4	968.6	12848.8
	157.2	25.0	18463.2	1294.9	17168.3

Tabla 13.2: Comparativa de costos mensuales en el consumo de energía entre VEs e ICEs según kilometraje diario recorrido

La diferencia entre los costos de la energía con el fin de impulsar al vehículo, determina un ahorro a favor del VE, por lo tanto, el ahorro mensual de optar por un vehículo eléctrico por sobre uno a combustión relativa al combustible se puede considerar como una ganancia. Entonces la columna "Diferencia mensual entre costos de energía VE vs ICE" de la tabla 13.2, determina el ahorro económico relacionado con la diferencia de costos en combustible. Observando los valores obtenidos en la tabla se concluye que el vehículo eléctrico aumenta el ahorro económico por mes al aumentar la distancia diaria recorrida.

13.2.2. Costo de mantenimiento

Los vehículos eléctricos no tienen embrague, correas de distribución, caja de cambios, sistema de escape, sistema de inyección, radiadores, bujías, no necesitan cambios de aceite, ni filtros de aceite, ni de combustible. Su mantenimiento rara vez implica la apertura del motor. La batería está garantida y usualmente no lleva mantenimiento. Lo usual es que visite el taller para realizar alineación y balanceo.

Nissan España, afirma que "El coche eléctrico te permite ejercer un control máximo de sus costes de funcionamiento: sin gasto en combustible y con un 20% menos de piezas mecánicas, tendrás un 40% menos de gastos de mantenimiento y un menor riesgo de averías..." [97].

También, realiza una comparación de costes de mantenimiento de dos de sus vehículos. Compara el "Coste de mantenimiento medio anual para 5 años, modelo Nissan Qashqai Diesel 1.6 DCI EuroV (Modelo 2013). Impuestos incluidos. No incluye cambio de neumáticos" con el "Coste de mantenimiento medio anual para 5 años, modelo Nissan LEAF 30 kWh. Impuestos incluidos. No incluye cambio de neumáticos". Estima de esta forma que el coste anual promedio para el mantenimiento del Nissan Qashwai es de \in 230.00 anuales, mientras que para el Leaf, es de \in 76.0 anuales. Esto implica un ahorro mensual de \in 12.83, y de \in 154.0 anuales en mantenimiento [98].

En la nota de Búsqueda [99], "Llegaron los eléctricos" [52], se menciona que: "el JAC S2 a nafta, como muchos otros, requiere de un servicio cada 10000 kilómetros, que cuesta en promedio 260 dólares cada vez que entra al taller. En cambio, el modelo eléctrico lo requiere cada 20.000 kilómetros y "es más barato, porque solo se le realiza balance y alineación"". Esto implicaría un ahorro aproximado de US\$ 1300 en un lapso de 10 años.

La información obtenida de Nissan España compara el mantenimiento de un vehículo diessel, y la nota de búsqueda un vehículo nafta. Dado que Búsqueda imprime información local (en Uruguay), se utilizará el dato del ahorro de US\$ 1300 a los 10 años, que implica US\$ 130 anuales. Esta es una diferencia más conservadora que la que se establece por Nissan, y por lo tanto, se considera que en el peor caso, se ahorrará al menos lo establecido.

13.2.3. Medidas de incentivo a los vehículos eléctricos en Uruguay

En Uruguay se han establecido medidas para promover e impulsar la incorporación de vehículos eléctricos.

Con el objetivo de lograr reducir el consumo de combustibles fósiles, las emisiones a la atmósfera de gases contaminantes y la contaminación sonora, Uruguay impulsa la incorporación de energéticos alternativos y la movilidad eléctrica [100].

La capacidad de generación instalada, con un componente de más del 90% de energías renovables, y el aporte de la energía eólica en la noche, establecen condiciones apropiadas para la incorporación de este tipo de cargas.

A continuación se mencionarán algunos de los beneficios e incentivos que se brindan para impulsar la movilidad eléctrica en nuestro país.

- Reducción de Impuesto Específico Interno (IMESI) (Decreto 246/012 [101]) para híbridos y eléctricos. Vehículos de pasajeros eléctricos: IMESI 5,75 % frente a 115 % en vehículos a gasoil, y entre un 23 % a 46 % para gasolina [100].
- Ley de promoción de inversiones (Decreto 02/12 [102]): La Ley otorga beneficios a proyectos cuya inversión favorezca a diferentes sectores. En par-

ticular, si la empresa presenta un proyecto donde hay inversión en vehículos utilitarios eléctricos, dicha inversión se reduce desde un 30% hasta más de un 70% a través de la exoneración de IRAE [100].

- Certificado de eficiencia energética: Es un instrumento económico del MIEM, el cual premia las medidas de eficiencia energética implementadas. En particular, los vehículos eléctricos se premian con un beneficio económico que equivale entre 3 % a 30 % de la inversión [100].
- Exoneración de tasa global arancelaria (TGA): Autos y transporte de mercancías solo con motor eléctrico pagan 0 % TGA ya que como Uruguay no tiene producción nacional de vehículos eléctricos, se promovió la importación con la reducción de 23 % al 0 % de dichos aranceles de importación [100].
- 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 Horario Residencial al 50% en horario Fuera de Punta (fuera de 18:00 horas a 22:00 horas) [100].
- Prueba gratuita de utilitarios eléctricos del Proyecto MOVÉS [103]: El Proyecto MOVÉS promociona la inserción en las empresas de vehículos utilitarios eléctricos mediante una prueba gratuita de dichos vehículos. La prueba es sin costo y tiene un mes de duración [100].

13.2.4. Cálculo de recuperación de inversión inicial

Para saldar la diferencia de inversión inicial entre la adquisición de un eléctrico o un vehículo a combustión interna, y comenzar a obtener ganancias, se deben considerar los cálculos realizados en las sub-secciones 13.1.2 y 13.2.2. En relación a lo establecido en la subsección 13.2.3, se considerará el descuento del 50% del cargo por energía para las condiciones nombradas anteriormente. El resto de los beneficios tendrán también un impacto positivo, pero deberán ser estudiados en los casos particulares.

Se considerará un ajuste inflacionario anual del techo del rango meta [104], del 7.0 %.

La diferencia de costo anual se regirá entonces por la ecuación:

$$Ahorro_Anual_{Total} = A_Anual_{combustible} + A_Anual_{mantenimiento}$$
(13.1)

Donde $Ahorro_Anual_{Total}$ es el ahorro anual que se tendría en los gastos cotidianos del vehículo eléctrico contra el vehículo a combustión en el año cero (2019). Este ahorro se desglosa, para este estudio, solamente en $A_Anual_{combustible}$ (ahorro anual en combustible) y $A_Anual_{mantenimiento}$ (ahorro anual en mantenimiento).

Para cada año que pasa, se realiza un ajuste del $7\,\%$ [104] en los respectivos ahorros, por lo que la ecuación para el año n será:

$$Ahorro_n_{Total} = \sum_{i=0}^{n} \left(A_Anual_{combustible} + A_Anual_{mantenimiento} \right) 1,07^n \quad (13.2)$$

Donde $Ahorro_n_{Total}$ será el ahorro total pasado el año n desde la adquisición del vehículo en el año cero, que será 2019.

¿Cuánto tiempo deberá pasar para alcanzar cubrir con la diferencia entre la inversión inicial entre el VE y el ICE?

Al igualar $Ahorro_{Total}$ con la diferencia inicial se estaría en el punto a partir del cuál el vehículo eléctrico generaría una ganancia. Utilizando la ecuación 13.2 y las diferencias de costo de adquisición de los VEs contra los ICEs mostradas en la tabla 13.1, se procede a construir la tabla 13.3.

La tabla 13.3 muestra para cada vehículo eléctrico, los años que llevaría recuperar la diferencia de adquirir uno a combustión en función del kilometraje diario recorrido. La columna "Ahorro al finalizar año cero (\$)" muestra la diferencia del resultado de la ecuación 13.2 para el primer año (año cero, que equivale al 2019). Los precios en dólares se convierten según el tipo de cambio (\$ 35.195) al 30/05/2019 [105].

Vehículo	Diferencia inversión inicial (\$)	Distancia recorrido diario (km)	Años para recuperar diferencia	Ahorro al finalizar año cero (\$)
Benault Kangoo ZE		39.3	10.4	55 242
	827 082.5	78.6	6.3	$105 \ 969$
		117.9	4.6	156 636
		157.2	3.6	$207 \ 115$
Renault ZOE		39.3	6.2	56 100
	423 325.5	78.6	3.5	$107 \ 610$
		117.9	2.5	159 911
		157.2	1.9	210 595

Tabla 13.3: Repago de diferencia de inversión inicial en la adquisición de VE vs un ICE

En la tabla 13.3 se nota claramente como aumenta la rentabilidad del auto eléctrico con el kilometraje diario recorrido. Esto puede observarse tanto en la disminución del tiempo de repago, como en el incremento del ahorro al finalizar el año cero. En el cálculo, la diferencia se explica por los costos en la energía, ya que no se consideró la variación del costo de mantenimiento con la distancia recorrida (que en realidad también aumentará el beneficio a favor del vehículo eléctrico).

13.3. Rentabilidad del sistema V2G

El marco normativo actual, en la República Oriental del Uruguay, para clientes en baja tensión, no permite la inyección de energía hacia la Red de distribución

13.3. Rentabilidad del sistema V2G

desde vehículos eléctricos, o desde acumuladores de energía. Es coherente sin embargo, plantearse la posibilidad de que en la medida que la movilidad eléctrica avance y conquiste su espacio en la población, se maneje la alternativa de gestionar la batería hacia la red o hacia el hogar. De tener una normativa implementada, podría llegar a aumentar el estímulo para la adquisición de vehículos eléctricos. También puede de esta forma brindar a la utility una nueva herramienta de gestión de la Red, pudiendo tener una "generación" de acumulación distribuida a la cual acceder.

En el caso en que no se llegue a permitir la inyección de energía, se puede pensar en la posibilidad de utilizar la energía disponible en la batería de los vehículos para abastecer los equipos propios, ya sea conectado a la Red (en paralelo, si la normativa lo permite), o aislado de la misma (implementando un sistema correctamente diseñado, por ejemplo, a través de una llave doble vía).

En un escenario como el que se plantea el día de hoy por parte de la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE), con la presencia de tarifas múltiple horario como la "Tarifa Residencial Triple Horario" [90], la "Tarifa Residencial Doble Horario" [90], o nuevas tarifas que se puedan ir incorporando producto de los cambios en el consumo, en la generación y el uso de la información disponible al implementar un sistema de medida inteligente, el cliente podría desplazar sus consumos a conveniencia para disminuir los costos en su tarifa eléctrica. Sin inyectar energía a la Red, el cliente podría disminuir su consumo en los tramos de punta o llano y cargar su vehículo en los períodos de valle (o cualquier período que se defina como de bajo costo).

13.3.1. Ganancia por carga diferida

Hasta el momento, por lo expuesto en 13.1.1, el escenario más favorable para realizar un "Demand Side Management" para desplazar el consumo de energía desde el período caro al más barato mediante el uso de la batería en el vehículo, surge de contratar una Tarifa Doble Horario Residencial, cargar en un punto de carga de UTE en ValleTME, y volcar la energía al uso del hogar en el período de Punta. De resultar poco práctico cargar en ValleTME en un punto de recarga de UTE, la segunda opción más rentable sería con la Tarifa Doble Horario Residencial, cargando Fuera de Punta (con un 50 % de descuento) y utilizando la energía desde la batería en horario de Punta.

Considerando más práctico y más factible que el usuario común cargue su vehículo en su domicilio en Fuera de Punta, es que se plantea la ecuación de ganancia (G) 13.3, que busca calcular el ahorro que implica diferir el consumo del hogar desde la Punta hacia fuera de Punta:

$$G = E_{diferida} \cdot (C_{Punta} - C_{Fuera_de_Punta})$$
(13.3)

Donde la $E_{diferida}$ está en kWh y es la energía que se carga al acumulador en el período de Fuera de Punta y se descarga al hogar en Punta. La Ganancia está en pesos uruguayos y el C_{Punta} y el $C_{Fuera_de_Punta}$ son los cargos definidos para la Punta y el Fuera de Punta para la Tarifa Doble Horario Residencial (ver 13.1.1).

De no haber considerado el descuento del 50% planteado para usuarios de vehículos eléctricos, el escenario más favorable para que el cliente con acumulación desplace el consumo desde los tramos "caros" a los "baratos", sería con la TRTH, desplazando el consumo desde la Punta hacia el Valle.

13.3.2. Cálculo de energía entregada y ganancia asociada

Según el recorrido diario de cada usuario, y el tipo de vehículo del que disponga, se logrará conocer la cantidad de energía que tendrá disponible al regresar al hogar. Se centrará el análisis de esta sección en los mismos recorridos y vehículos estudiados en la sección 13.2.4.

Al final del día, según el recorrido diario que se haya realizado, quedará determinada la energía remanente. Con el algoritmo de V2G implementado, se fija una consigna de potencia a entregar a los equipos, red, o micro-red que se desee alimentar y no se permite que la batería se descargue por debajo del 10 % del SOC. De este modo, la energía máxima que se les podrá extraer a los vehículos será la energía remanente, menos el 10 % de la energía total almacenable. Utilizando los datos de energía consumida de la tabla 13.2 para los recorridos a estudiar es sencillo determinar la energía que se podrá entregar a la red. La ecuación 13.3 permitirá calcular el ahorro generado por energía diferida.

Planteado el escenario de la sección (13.1.1), se opta por entregar toda la energía posible en el período de Punta. Este será el caso de mayor ganancia, aunque no necesariamente un hogar necesitará toda esa energía en el horario de Punta, y quizás incluso en el día.

En la tabla 13.4 se despliegan los cálculos realizados para el "Ahorro mensual por energía diferida (\$)" que implica diferir la "Energía disponible para V2G (kWh)" desde el período de Punta hacia Fuera de Punta para cada uno de los casos de estudio (39.3 km, 78.6 km, 117.9 km y 157.2 km).

	Distancia	Energía disponible	Ahorro mensual
Vehículo	diaria	para V2G	por energía diferida
	(km)	(kWh)	(\$)
	39.3	20.2	4179
Renault Kangoo	78.6	12.6	2605
	117.9	4.9	1014
	157.2	0	0
	39.3	30.7	6351
Renault Zoe	78.6	24.4	5048
	117.9	18.2	3755
	157.2	11.9	2462

Tabla 13.4: Ahorro asociado a diferir el consumo de energía desde la Punta a Fuera de Punta utilizando la energía remanente disponible para V2G en el vehículo según el recorrido diario realizado

Para los casos incluidos en la tabla 13.4, se asume que se consume toda la

energía disponible para V2G en Punta y que se realiza un recorrido diario por 30 días al mes.

Será un factor de influencia entonces que la población esté capacitada e informada para aprovechar las ventajas que pueda proporcionar un vehículo eléctrico.

En la sección 13.2.4, se determinó la ecuación 13.2, que permite realizar el cálculo del ahorro al año n partiendo del año cero (2019), considerando el ahorro en la energía consumida para locomoción del VE vs el ICE y la diferencia del costo de mantenimiento anual entre los mismos. En esta sección se incorporará en la ecuación el ahorro con la estrategia de V2G planteada.

La nueva ecuación de ahorro anual, al año n queda determinada por:

$$Ahorro_con_V2G_{Total} = \sum_{i=0}^{n} \left(A_combustible + A_mantenimiento + A_{V2G}\right) 1,07^{n}$$
(13.4)

Donde todos los ahorros planteados son anuales. A_{V2G} será el ahorro anual por V2G del año cero (2019) para cada vehículo (ahorro mensual por 12 meses). Utilizando la misma metodología que para completar la tabla 13.3, pero incorporando A_{V2G} con la ecuación 13.4, se construye la tabla 13.5.

	Diferencia	Distancia	Años para	Ahorro al
Vehículo	inversión	recorrido	recuperar	finalizar ano
	inicial (\$)	diario (km)	diferencia	cero (\$)
Renault Kangoo ZE		39.3	6.3	$105 \ 390$
	827 082.5	78.6	5.0	$137 \ 227$
		117.9	4.3	168 799
		157.2	3.6	207 115
Renault ZOE		39.3	2.9	132 312
	423 325.5	78.6	2.3	$168 \ 189$
		117.9	2.0	$204\ 175$
		157.2	1.8	$240\ 140$

Tabla 13.5: Repago de diferencia de inversión inicial en la adquisición de VE vs un ICE incorporando V2G

Del análisis realizado en la sección 12.3.4, surge que con el algoritmo para el cálculo del SOH implementado, para los dos vehículos trabajados, las baterías tienen una vida útil de 5 años realizando un Ciclo Estándar y una descarga hacia la Red hasta un 10% del SOC diaria. Esto significa que, para la Renault Kangoo ZE no se llega a recuperar la inversión inicial antes de que la batería se deteriore. Para el ZOE, se tendrán 2.1 años de ganancia hasta el quinto año. Habrá que evaluar si la ganancia es suficiente para reemplazar la batería, o si el cliente está satisfecho con los cinco años de uso. También habrá que evaluar cómo se encuentra el chasis y otras partes mecánicas del auto, que a fin de cuentas, han recorrido para el Zoe algo más de 72 000 km.

Cabe destacar que el coste del Renault Zoe fue estimado a través de una relación simple. Será determinante el conocer el verdadero costo de los vehículos

eléctricos en el mercado uruguayo (o en el que se vaya a estudiar) para realizar las comparaciones adecuadamente.

Antes de realizar un análisis más detallado sería bueno conocer los costos de las baterías de los vehículos eléctricos, y especular con la posibilidad de adquirir una nueva batería al alcanzar el fin de la vida útil de la primera.

13.4. Coste de las baterías de los VEs

Con el fin de realizar un análisis más profundo, se incluyen estimaciones para los costos de las baterías de los vehículos implementados.

Para el Renault Zoe (en España) se tienen dos modalidades de uso, una que contempla el alquiler de la batería, y otra en la cuál el usuario se hace propietario de la misma [106].

Para el alquiler de la batería se resaltan las ventajas, que serían:

- Pago mensual en función de los kilómetros recorridos.
- Sustitución gratuita en caso de reducción del rendimiento.
- Asistencia ininterrumpida.
- Reducción del coste de compra del vehículo.

En la tabla 13.6 se observan los precios del alquiler de la batería del Zoe de 41 kWh en España, según el kilometraje recorrido.

Kilometraje anual (km)	Alquiler mensual para batería del Z.E. (${\ensuremath{\in}}$)
7500	69
10 000	79
12 500	79
15 000	79
17 500	99
ilimitado	119

Tabla 13.6: Alquiler de baterías para el Renault Zoe [106]

Por lo tanto, de estar disponible la opción de alquilar la batería en Uruguay, se podrá especular con la compra o alquiler según el kilometraje diario a recorrer, disminuyendo el coste de adquisición del vehículo.

El costo de la adquisición de la batería del ZOE es de aproximadamente \in 7500 [107] [108], que ,según el arbitraje (1.1172 US\$/ \in al 30-05-2019 [105]), equivale a US\$ 8379.

Esto implica, que en la adquisición del Renault Zoe, se podrían llegar a abaratar US\$ 8379 considerando alquilar la batería. Cabe analizar cuanto se gastaría anualmente en el alquiler de la misma. Al realizar 39.3 km diarios, se recorren 1179 km mensuales, y 14148 km anuales. Esto implicaría estar en la franja de \in 79 mensuales, US\$ 88.3 mensuales, que ocasionan un gasto anual de US\$ 1059.

Para dos Ciclos Estándar diarios (78.6 km), se recorrerían 28269 km anuales, que deberán contemplar utilizar el plan ilimitado de \in 119, equivalentes a US\$ 1595 anuales. Cabe destacar que el "ilimitado" es para usuarios particulares.

Para 117.9 km y 157.2 km diarios aplicará lo mismo que para el caso anterior, debido a que excede la franja de los 17 500 km.

Según lo comentado, al octavo año de alquilar el vehículo se empataría el coste de adquirir la batería para un usuario que recorre 39.3 km diarios, y a mediados del quinto para una persona que realiza más de 78.6 km diarios.

Según lo propuesto para el kilometraje, que implica un cuidado por parte de los clientes en el deterioro de la batería, se asume que al alquilar la batería nunca se podrán realizar descargas a la red o el hogar.

Cabe resaltar que todos los costos mencionados son para España, y que no necesariamente serán los mismos de aplicarse en Uruguay.

También en España [109], para la Renault Kangoo se ofrece una fórmula de alquiler basada en el kilometraje anual similar a la propuesta para ZOE, que se detalla en la tabla 13.7.

Kilometraje anual (km)	Alquiler mensual para batería del Kangoo Z.E. (euros)
7500	58.3
10 000	66.3
12 500	74.3
15 000	82.3
17 500	90.3
20 000	98.3

Tabla 13.7: Alquiler de baterías para el Renault Kangoo ZE 33 [109]

Las cuentas de kilometraje para 39.3 km entran en la franja de hasta 15 000 km, y costarían unos US\$ 988 anuales. Para recorridos diarios de más de 78.6 km, no estaría tabulado el costo mensual, pero de ser posible alquilar la batería por este kilometraje, sería mayor que US\$ 1180 mensuales.

El costo de las baterías en España para la Renault Kangoo ZE 33 ronda los \in 9100 [110], equivalentes a US\$ 10 167 (cotización al 30/05/2019 [105]). Entonces, para vehículos que circulen hasta 39.3 km diarios convendría alquilar la batería hasta aproximadamente 10 años.

Es claro ver para ambos vehículos como a menor kilometraje de recorrido diario, el alquiler de baterías se hace más atractivo.

13.5. Análisis de resultados obtenidos

Según el algoritmo de SOH estudiado, y los resultados mostrados en la tabla 12.9, **para un uso sin descargas a la red**, todas las baterías de los vehículos

estudiados superan el número de ciclos que corresponde a 10.4 años (3744 ciclos) al recorrer 39.3 km diarios. Por los costos vistos en la sección 13.4, el alquiler de las baterías no sería conveniente al utilizar el automóvil con esta intensidad por toda la vida útil de la batería. Para ambos modelos de VE se llegaría a recuperar la diferencia de la inversión inicial. Para el Renault Kangoo, sería en 10.4 años y para el Zoe en 6.2 años (ver tabla 13.3). A partir del tiempo umbral mencionado se comenzará a tener ganancia.

Al recorrer 78.6 km diarios, para conseguir el repago de la diferencia inicial se necesitan 6.3 años para la Kangoo y 3.5 años para el Zoe (tabla 13.3), equivalentes a 2268 ciclos y 1260 ciclos respectivamente. Según la tabla 12.10, la vida útil de la batería del Kangoo al realizar este recorrido diario sería de 4283 ciclos y la del Zoe de 8553 ciclos, por lo que ambos alcanzarían el mes de repago y tienen al menos 2015 ciclos (caso Kangoo) para obtener un superávit.

Con recorridos diarios de 117.9 km se necesitarán 4.6 años para recuperar la diferencia inicial de la Kangoo y 2.5 años para el Zoe (tabla 13.3 o figura 13.1). Para completar los 4.6 años que necesita la Kangoo, se necesitaría que la batería alcance al menos los 1656 ciclos de uso. De la tabla 12.11 se extrae que el Renault Zoe alcanza con holgura este valor, perdurando 4605 ciclos. El Kangoo también alcanza el valor, llegando al 80 % de la capacidad de la batería en 2370 ciclos.

Para recorridos de 157.2 km se necesitarán 3.6 años para recuperar la diferencia inicial de la Kangoo y 1.9 años para el Zoe (tabla 13.3 o figura 13.1). Para la Kangoo se necesitan al menos 1296 ciclos, mientras que para el Zoe se necesitan 684. Simulando con el software implementado se obtiene que el Kangoo tolera 1689 ciclos, y el Zoe 3023, por los que ambos llegan a recuperar la inversión.

Entonces, tanto el Kangoo como el Zoe llegan a recuperar la diferencia de inversión inicial antes de que se deteriore la batería a un 80% cuando se utiliza el vehículo exclusivamente para transporte. El tiempo de recuperación mejora en la medida que el kilometraje diario aumenta.

Se incorpora el gráfico de la figura 13.1 para facilitar el análisis, La misma contiene los meses de repago para los dos vehículos trabajados en el presente capítulo según la distancia del recorrido diario realizada. Se incluyen los repagos con y sin V2G.

13.5. Análisis de resultados obtenidos



Figura 13.1: Meses de repago para el Renault Zoe y Kangoo 33 con y sin V2G.

Se observan en rojo (ver figura 13.1) las curvas que representan el repago de la Renault Kangoo. La curva entera marca el mes de repago en caso de no utilizar V2G, y la curva punteada incorporando el uso de V2G a la ecuación de retorno. En azul se observan los valores obtenidos para el Renault Zoe. Los puntos marcados (tanto en rojo como en azul), son las muestras a partir de las que se componen la curvas. Entre los puntos se muestra una interpolación lineal entre los cuatro puntos relevados para cada curva.

El gráfico en la figura 13.1 permite ver los valores de repago expresados en los párrafos anteriores. Se hace claramente visible la disminución del tiempo de retorno de la diferencia de inversión entre adquirir un VE vs un ICE con el aumento del kilometraje en todos los casos.

Se presentan también las figuras 13.2 y 13.3, que muestran el crecimiento de las ganancias en función del tiempo transcurrido para un recorrido diario de 39.3 km. En azul se representa la ganancia considerando el V2G y en rojo las que no contemplan el V2G. En ambas se representa con una línea punteada horizontal en negro la ganancia que hay que recuperar para empatar la diferencia de inversión inicial (VE vs ICE).



Figura 13.2: Ahorro para el Renault Kangoo con un recorrido diario de 39.3 km en función de los meses de uso.



Figura 13.3: Ahorro para el Renault Zoe con un recorrido diario de 39.3 km en función de los meses de uso.

De la comparación de las figuras 13.2 y 13.3 se observa que el crecimiento de las ganancias en función del tiempo tiene forma similar, pero crecen a diferentes ritmos. El Renault Zoe recupera antes la inversión por dos factores, el primero que queda en evidencia es la menor diferencia de costo inicial. Luego, para el mismo tiempo en meses, el Zoe reporta mayor ganancia. Esto es debido a que el rendimiento en kWh/km es mejor que el del Kangoo. Para el caso con V2G se suma que el Zoe tiene una mayor capacidad de almacenamiento y entonces, una mayor capacidad para volcar energía a la red o el hogar.

13.5. Análisis de resultados obtenidos

Al considerar el caso de **descarga contra la red (V2G)**, los tiempos de repago mostrados en la tabla 13.5 disminuyen considerablemente respecto al caso en que no se considera la gestión de la carga como alternativa (ver tabla 13.3). Esto puede observarse con mayor claridad en el gráfico de la figura 13.1. La diferencia entre las curvas entera y punteada para un mismo color y mes de repago marcan la ganancia que aporta el V2G en cada caso. Cuanto menor es el kilometraje diario recorrido, mayor será el ahorro inducido por el V2G, ya que se dispondrá de mayor energía para diferir desde la Punta a Fuera de Punta. Para el caso del Renault Kangoo (en rojo en la figura 13.1), con 39.3 km diarios se reduce el tiempo de repago en 4.1 años utilizando V2G, para el caso de 78.6 km se reduce 1.3 años, para el de 117.9 km en 0.3 años y para el de 157.2 km no se reduce ya que no se puede entregar energía a la red (debido a que el SOC remanente será menor al 10 %). Para el Zoe se tiene algo similar, pasando de 3.3 años de reducción para 39.3 km a 0.1 años con 157.2 km.

iA qué costo se reduce el tiempo de repago al implementar el sistema V2G descripto? Al simular los distintos recorridos diarios seguidos de una descarga V2G hasta el 10 % del SOC, se obtiene del software implementado el número de ciclos que marcarán el deterioro de la batería hasta un 80 % de su capacidad. Para ambos vehículos trabajados y el tipo de descarga implementado, el resultado es de aproximadamente 5 años de vida (equivalentes a 60 meses y 1800 ciclos diarios).

¿Es conveniente la disminución de la vida útil aplicando V2G? Como se menciona en el párrafo anterior, la vida útil aplicando V2G es de aproximadamente 5 años o 60 meses. En las figuras 13.2 y 13.3 se pueden observar las ganancias acumuladas hasta el mes 60 para ambos vehículos. **Para el Renault Kangoo**, realizando 39.3 km diarios, la ganancia al mes 60 es de aproximadamente US\$ 17 770, es insuficiente para pagar la diferencia de inversión de US\$ 23 500 (faltarían recuperar US\$ 5 730). De adquirir una nueva batería para el Kangoo se deberían invertir nuevamente US\$ 10 167 (ver sección 13.4), por lo que se tendrían a compensar US\$ 15 897. A los 10 años (120 meses) la ganancia será de US\$ 42 680, que en relación al año 5 implicará una ganancia de US\$ 24 910. Por lo tanto, al compensar los US\$ 15 897 se obtendrían de ganancia neta a los 10 años US\$ 9 013.

Sin el uso de V2G la batería del Kangoo continuará estando vigente a los 12.5 años (150 meses) para un uso de 39.3 km diarios. De la figura 13.2 se aprecia que a los 10 años (120 meses) aún no se ha compensado la diferencia económica de la inversión inicial. Se extrae el ahorro al mes 150 para la Kangoo sin V2G, siendo de US\$ 30 760. Al compensar la diferencia inicial, queda un superávit de US\$ 7 260. Entonces, a los 10 años, sin V2G, no se compensa la diferencia, y a los 12.5 años se obtiene un superávit de US\$ 7 260.

De los dos párrafos anteriores surge que para recuperar la inversión inicial recorriendo 39.3 km diarios en la Kangoo se necesita un recambio de batería si se usa V2G (que implica una inversión adicional a los 5 años) o esperar los 10.4 años para empatar la inversión (sin V2G). En el primero de los casos se tendrán acumulados aproximadamente US\$ 9 013 a los 10 años y sin V2G US\$ 7 260 a los 12.5 años.

Para el Renault Zoe, con el recorrido de 39.3 km e implementando

V2G, a los 5 años se tiene una ganancia de US\$ 22 300 (ver figura 13.3). La diferencia inicial de adquisición de un VE vs ICE es de US\$ 12 028, por lo tanto, al año 5 se tiene un superávit de US\$ 10 272. Este capital es suficiente para reemplazar la batería (según las estimaciones de 13.4), cuyo costo es de aproximadamente US\$ 8 379. Entonces, si se sustituye la batería, se tendrán 5 años más de vida al mismo uso, obteniendo una ahorro total (desde el año cero) de US\$ 53 590, del que se deben descontar para obtener el balance al año 10, la diferencia de inversión inicial y el costo de la batería sustituida en el año 5, por lo tanto, al año 10 se tendrá un superávit de US\$ 33 183.

De no implementar el V2G, el Zoe tendrá a los 10 años una ganancia de US\$ 22 720, que restando la diferencia inicial da un superávit de US\$ 10 692.

De los párrafos anteriores se concluye que el sistema V2G propuesto es una buena opción para acortar la brecha en el tiempo de repago del vehículo para usuarios que recorran kilometrajes bajos (se dio estudio particularmente para recorridos de 39.3 km) y dispongan de una buena cantidad de energía para entregar a la red. El balance final se incrementará a favor del usuario en tres veces para el Renault Zoe, ascendiendo a unos US\$ 33 000 con el uso de V2G, considerando el costo de las baterías y vehículo estimados para Uruguay. En la medida que disminuya la brecha entre los VEs y los ICEs las ecuaciones plantearán ganancias más seductoras y períodos de repago inferiores.

En la figura 13.1 se observa como la distancia entre las curvas con y sin V2G disminuye en la medida que se incrementan las distancias diarias recorridas. Para el recorrido de 78.6 km se observa que las distancias para el Kangoo y el Zoe disminuyen en 1.3 años y 1.2 años respectivamente, pero la vida útil al aplicar V2G disminuye a 5 años, cuando sin V2G superaría los 11. El usuario deberá analizar si es prudente o no el aplicar V2G y evaluar las ganancias como fue planteado en este capítulo para decidir su accionar.

Dado el impacto que tiene en la salud de las baterías el realizar V2G del modo planteado, se estima que de contemplar el alquiler de baterías en Uruguay, los fabricantes o los dueños de las mismas no permitan implementar un sistema V2G en sus contratos.

Los mejores casos para la recuperación económica son aquellos en los cuales el vehículo se utiliza con recorridos diarios más extensos. Para los usuarios particulares que recorran poca distancia diaria será un proceso muy lento el recuperar la inversión inicial sin utilizar V2G. Para usuarios que trabajen con el vehículo, por ejemplo en el transporte oneroso de pasajeros, la inversión se recuperará rápidamente, y será conveniente. De los casos estudiados, sin inyección a la red, la Kangoo recupera la diferencia de inversión inicial a los 3.6 años recorriendo 157.2 km diarios y el Zoe en 1.9 años para el mismo recorrido. Luego de ese momento sólo se obtendrá excedente de la ecuación económica.

13.6. Complemento análisis económico

Los resultados y el análisis realizados en las secciones anteriores del presente capítulo se han basado en las ecuaciones de ahorro 13.2 y 13.4. Estas ecuaciones se

13.6. Complemento análisis económico

obtienen considerando que el ahorro anual (en pesos) se verá incrementado año a año por el valor de la inflación, manteniendo de esta forma el valor real de ahorro anual. Esto implica que los montos de ahorro y ganancia definidos no reflejan el valor que tiene el dinero a la actualidad, sino que representan el monto del futuro (no se considera el valor real que tendría traerlo a dinero de hoy).

Usualmente, en estimaciones para proyectos de inversión, un cálculo primario considera el valor de ahorro anual fijo en dólares (no se actualiza en el transcurso de los años), y se considera una tasa de oportunidad, cuyos valores anuales usuales se encuentran entre un 8% y un 10%.

Considerando entonces lo mencionado en los últimos párrafos, con una tasa del 8%, la ecuación para el ahorro sin V2G será:

$$Ahorro_n_{Total} = \sum_{i=1}^{n} \left(A_{combustible} + A_{mantenimiento} \right) \frac{1}{(1+0,08)^i}$$
(13.5)

La ecuación para el ahorro con V2G será:

$$Ahorro_n_V2G_{Total} = \sum_{i=0}^{n} \left(A_{combustible} + A_{mantenimiento} + A_{V2G}\right) \frac{1}{(1+0,08)^{i}}$$
(13.6)

Considerando entonces las ecuaciones 13.5 y 13.6, los tiempos de repago se verán incrementados y las ganancias generadas serán menores a las calculadas con las ecuaciones 13.2 y 13.4.

En las secciones 13.6.1 y 13.6.2 se incorporan los nuevos resultados.

13.6.1. Resultados considerando la ecuación 13.5

Utilizando el mismo procedimiento que en la sección 13.2.4, pero con la ecuación 13.5 se construye la tabla 13.8. Se muestran en la misma los montos en US\$.

	Diferencia	Distancia	Años para	Ahorro al
Vehículo	inversión	recorrido	recuperar	finalizar año
	inicial (US\$)	diario (km)	diferencia	cero (US\$)
		39.3	> 15	1 570
Renault Kangoo ZE	23 500	78.6	11.9	$3\ 011$
		117.9	6.8	4 451
		157.2	4.8	5 898
		39.3	11.3	1 594
Renault ZOE	10.000	78.6	4.8	3058
	12 020	117.9	3.0	4 544
		157.2	2.3	5984

Tabla 13.8: Repago de diferencia de inversión inicial en la adquisición de VE vs un ICE utilizando la ecuación 13.5

Para el caso de 39.3 km diarios, utilizando la ecuación 13.5 no se llega al tiempo de repago para el Renault Kangoo. Esto es debido a que el ahorro real disminuye

un 8 % anual, y la ganancia para este kilometraje tiende asintóticamente a un valor menor a los US\$ 23500 que se deben recuperar para el Kangoo sin V2G.

De la comparativa entre las tablas 13.3 y 13.8 se nota claramente el incremento de los tiempos de repago. Cuánto menor es el kilometraje diario realizado, mayor es el tiempo de repago para ambos casos y mayor será la diferencia entre los resultados obtenidos con las dos metodologías utilizadas.

Para el Renault Zoe, al realizar 39.3 km se tiene una diferencia entre las metodologías de 5.1 años, y en el caso de 157.2 km de 0.4 años.

Al analizar las ganancias a los 5 años, se tiene, en el caso más favorable que corresponde a 157.2 km diarios, un ahorro de US\$ 23 891 para el Zoe. Descontando la diferencia inicial entre el Clio y el Zoe se obtiene una ganancia de US\$ 11 953. Para el caso del Kangoo basta observar en la tabla 13.8 que se recupera la inversión inicial (a los 4.8 años).

13.6.2. Resultados considerando la ecuación 13.5

Utilizando el procedimiento de la sección 13.3.2, con la ecuación 13.6 se construye la tabla 13.9.

Vehículo	Diferencia inversión inicial (US\$)	Distancia recorrido diario (km)	Años para recuperar diferencia	Ahorro al finalizar año cero (US\$)
Renault Kangoo ZE	23 500	39.3 78.6 117.9 157.2	12.0 8.1 6.2 4.8	$\begin{array}{c} 2 & 995 \\ 3 & 899 \\ 4 & 796 \\ 5 & 885 \end{array}$
Renault ZOE	12 028	39.3 78.6 117.9 157.2	3.7 2.8 2.3 1.9	3 759 4 779 5 800 6 823

Tabla 13.9: Repago de diferencia de inversión inicial en la adquisición de VE vs un ICE con V2G utilizando la ecuación 13.6

De la comparación entre las tablas 13.5 y 13.9, se nota el incremento entre los tiempos de repago al considerar la ecuación 13.6. El caso de mayor diferencia es el de la Renault Kangoo para 39.3 km, donde se incrementa el tiempo de repago en 5.7 años. Para el mismo vehículo, recorriendo 157.2 km la diferencia es de 1.2 años. Esto remarca lo observado en la sección 13.6.1 (en relación al kilometraje y la diferencia de tiempos de repago).

En la tabla 12.12 se encuentra que realizando V2G, las baterías tienen una vida útil de aproximadamente 5 años al ser descargadas hasta un 10% de su estado de carga luego de realizar 39.3 km diarios con el ciclo Estándar. Con el Renault Kangoo ZE, recorriendo 39.3 km diarios no se llega a recuperar la inversión inicial antes de los 5 años. Esto ya sucedía con el análisis planteado en la sección 13.3.2.

13.6. Complemento análisis económico

Para el Renault Zoe se sigue recuperando la inversión antes de los 5 años. En este caso se tendrán 1.3 años para generar ganancias, ya que el repago se da a los 3.7 años. Entonces, habiendo descontado la diferencia de inversión inicial (US\$ 12 028), el Renault Zoe habrá generado una ganancia de US\$ 2 972. Este capital no es suficiente para reemplazar la batería al costo que tienen hoy, cuyo valor aproximado es de US\$ 8 379. El usuario deberá decidir si desea realizar una inversión extra para continuar utilizando el vehículo con una nueva batería.

Si el usuario del Zoe decide cambiar la batería y continuar con el mismo uso, a los 10 años habrá generado un ahorro de US\$ 25 227, a los cuales se le restan los US\$ 12 028 de la inversión inicial y los US\$ 8 379 de la nueva batería, obteniendo una ganancia de US\$ 4 820.

La diferencia entre los US\$ 4 820 obtenidos en la ecuación anterior y los US\$ 33 183 se da por motivos evidentes; una ecuación ajusta por inflación actualizando el valor real del ahorro y la otra considera la tasa de oportunidad que implica traer el dinero a la actualidad.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 14

Conclusiones

14.1. Modelado

Se elaboró una herramienta de modelado (ver descripción en capítulo 8) para realizar simulaciones con vehículos eléctricos. La misma es capaz de simular el andamiento de distintos modelos de automóviles cumpliendo con distintos perfiles de velocidad en función del tiempo, o ciclos de conducción.

Se generó una interfaz gráfica (ver capítulo 9) de fácil comprensión para el usuario, que permite simular diversas combinaciones de uso, incluyendo ciclos de conducción, cargas de la batería del automóvil y descargas de la misma hacia la red o el hogar. A su vez se pueden modificar parámetros de los vehículos (por ejemplo si se desea ampliar la energía de su paquete de baterías, la potencia del motor, etc), realizar una comparativa o evaluación de los mismos al recorrer el ciclo de conducción deseado.

La interfaz permite evaluar el deterioro en capacidad de la batería al efectuarse una cantidad n de ciclos, mediante la aplicación de un algoritmo de estimación del estado de salud (ver capítulo 7.4) y también determinar el número de ciclos en los cuales se llegará al 80 % de la capacidad máxima de almacenamiento de la batería.

Se realizó una prueba real en un vehículo Renault Kangoo ZE, propiedad de UTE, lo cual permitió relevar datos sustanciales para la elaboración y correcta validación del modelo del vehículo. En dicha prueba se recopilaron datos que se utilizaron para elaborar un ciclo de conducción local, con perfiles de velocidad y pendientes reales, realizados por un conductor experimentado. Se buscó cubrir con los recorridos, diferentes situaciones de uso real en la ciudad de Montevideo, abarcando trayectos con pendientes inclinadas, velocidades de ruta, rambla y trayectos netamente urbanos.

Uno de los resultados más relevantes de la prueba ejecutada en el vehículo de UTE, surge al realizar el ajuste de la Renault Kangoo ZE en el modelo. Se calibró el ajuste en el modelo para que su consumo, considerando el SOH de la batería (el cual mediante los datos relevados se estimó que era del 86.36 %), fuese el obtenido en la prueba real. Al ajustar con esta metodología, se logró un SOC al

Capítulo 14. Conclusiones

final de la simulación de 53.6%, valor que asocia un error bajo (del 1.1%) respecto al indicado por la computadora a bordo (del 53%). De este modo, se concluye que el modelado para la Renault Kangoo ZE es válido, en base a la prueba realizada.

Para ajustar el resto de los vehículos en los que no se pudo realizar una prueba real, se procedió a calibrar de forma que la autonomía simulada se aproxime a los datos declarados por los fabricantes en cuanto a la autonomía con los ciclos internacionales (NEDC y WLTP). Luego de ajustados los vehículos, tal como se describe en el capítulo 11, se observa que la autonomía simulada dista en el peor caso en un 4.67 % con respecto a lo declarado por los fabricantes. Por lo tanto se considera que el modelo representa de forma correcta el andar de los vehículos. Se debe destacar el resultado particular de la Kangoo, la cual, como se mencionó anteriormente, fue ajustada para cumplir con el ciclo completo Montevideo, y al compararla con lo declarado por el fabricante para el ciclo NEDC, el error relativo dio tan sólo un -1.41 %, por lo que además se puede afirmar que fue de mucha utilidad el hecho de haber podido realizar pruebas de campo reales al momento de ajustar el modelo y se concluye que el modelado para la Kangoo es correcto.

14.2. Ciclos Internacionales

Se realizaron análisis haciendo foco en los distintos ciclos de conducción internacionales (WLTP y NEDC) de forma de evaluar que tan bien representan a un ciclos de conducción real. Se simularon para este estudio los ciclos NEDC, WLTP y Montevideo. Las comparaciones entre los tres ciclos simulados son determinantes, ya que el ciclo completo Montevideo (el cual representa un ciclo "real"), implica una reducción de autonomía en comparación con el NEDC de al menos un 37.6 % y comparando con el WLTP de al menos un 15.1 %, tal como se indica en la sección 12.1.1. Esta reducción de autonomía es muy considerable,por lo que el usuario deberá tener en cuenta este margen de diferencia a la hora de adquirir un VE.

También fue de interés estudiar como se ven afectados los ciclos anteriores frente al hecho de considerar pendientes en sus recorridos, ya que las pruebas de los ciclos internacionales son realizadas sin considerar las mismas.

Se realizaron simulaciones en donde se agregó una pendiente de 0.2243° (promedio de pendientes para el ciclo Montevideo Shopping - Ciudad Vieja, ver 12.1.1) a los ciclos WLTP y NEDC para apreciar el efecto que tiene sobre los mismos (ver tablas 12.2, 12.3, 12.4). Para el ciclo WLTP, implica una disminución de autonomía (comparado al mismo ciclo sin pendiente) de un 14.5 % ± 1.1 % en todos los vehículos simulados. Para el ciclo NEDC, la autonomía se reduce un 16.9 % ± 3 %. Para el ciclo completo Montevideo, el hecho de considerar las pendientes acorta la autonomía en un 24 % ± 1.3 %. Es determinante entonces (para el modelo realizado) el peso que tiene el considerar la pendiente en los ciclos de conducción. Por lo tanto, al relevar un ciclo de conducción no es recomendable relevar solamente el perfil de velocidades, sino que es necesario considerar el perfil de pendientes del recorrido. En la sección 12.1.2, se simulan los ciclos internacionales con y sin pendiente (NEDC y WLTP) con la Renault Kangoo ZE. Se corrobora que el hecho de agregar las pendientes lleva a que se aumentan las exigencias al motor en cuanto al torque y potencia, esto hace que no sea despreciable el efecto de considerar las inclinaciones en el terreno, ya que inducen a que el rendimiento (medido en kWh/km) decrezca. Para el ciclo Montevideo, que se considera el caso de estudio más relevante debido a que fue implementado en el mencionado modelo de vehículo, al discriminar el ciclo sin pendiente y con pendiente se obtiene una diferencia del 33 % menor del rendimiento en kWh/km, valor para nada despreciable. Esto destaca nuevamente la importancia de considerar las pendientes. Otro dato interesante obtenido en la sección 12.1.2 es que los rendimientos obtenidos para el ciclo Montevideo sin pendiente y el WLTP (también sin pendiente) son los mismos. Esto muestra que la respuesta del modelo en perfil de velocidades para la Kangoo es similar para ambos ciclos de conducción (en rendimiento promedio).

De los párrafos anteriores surge que es importante cuestionar la veracidad del dato de la autonomía en comparativa con un ciclo real, ya que se estima mediante las simulaciones realizadas, que el valor brindado por los fabricantes en cuanto a autonomías no debe tomarse como cierto para un ciclo real. Si se tiene el valor de autonomía con el WLTP, o el NEDC debe considerarse que el efecto de las pendientes atenúa estos valores. No sería representativo de todos los ciclos de conducción el encontrar un valor porcentual de error del ciclo WLTP o el NEDC, ya que el único ciclo relevado ha sido el Montevideo. Sería necesario un análisis estadístico para determinar el perfil de consumo de una región o un recorrido. Cabe destacar que el consumo también varía según el perfil de cada conductor.

14.3. Comparativa de vehículos

En la sección 12.2 se calcularon los rendimientos de cada vehículo en kWh/kmpara el ciclo completo Montevideo y se comparó con los rendimientos obtenidos según los datos del fabricante. Todas los rendimientos calculados son menores para el caso del ciclo Montevideo que los obtenidos para los ciclos NEDC y WLTP.

Al ordenar los vehículos por rendimiento según los datos del fabricante y contrastar con lo simulado para el Ciclo Montevideo, se mantiene el orden de los vehículos salvo por el VW E-up!. El VW E-up! se encuentra según el ciclo NEDC y su energía útil en segundo lugar en eficiencia luego del Renault Zoe. Luego de realizadas las simulaciones baja en cuanto a posiciones de rendimiento quedando únicamente por encima del BYD E6. Los valores de rendimiento alcanzados en el ciclo Montevideo Completo indican que el Renault Zoe cuenta con 0.159 kWh/km, mientras el BYD E6 es el caso de mayor consumo obteniéndose 0.261 kWh/km.

En primera instancia no es posible determinar si el caso del VW E-up! presenta dificultades a adaptarse al modelado, si se tienen que realizar consideraciones particulares, o si es adecuado. Una buena manera de verificar esto sería accediendo a un VW E-up! y relevando los parámetros necesarios para luego simular y contrastar los datos relevados con los simulados.

14.4. Ciclo estándar diario y análisis del SOH de las baterías

Se generó un nuevo recorrido Estándar, netamente urbano, de uso diario para un usuario en la ciudad de Montevideo, de 39.3 km. Se evaluó el efecto de realizar este ciclo una vez al día para vehículos que cuentan con batería de litio NMC. Para este recorrido, se evalúa la vida útil de las baterías. Se observa que los vehículos con menor energía útil en sus baterías son los que sufren el mayor deterioro. Esto es debido al mayor DOD que genera el mismo recorrido.

Se evaluó la gestión de la carga del vehículo utilizando el ciclo Estándar. Se compara el caso en que se carga el vehículo cada dos días de uso (se recorren dos ciclos Estándar con una carga), se obtiene que el Renault Zoe rinde un 43 % más al ser cargado diariamente. Para el Renault Kangoo ZE 33, se tiene que su vida útil aumenta en un 76 % al ser cargado diariamente, mientras que el E-up! aumenta su vida útil en un 25 %. Por lo tanto, lo recomendable es no exponer la batería a grandes DOD.

Se estudió la afectación de la batería al realizar un ciclo Estándar y luego descargar contra la red hasta el 10 % del SOC. Es notorio que la vida útil de la batería se reduce considerablemente frente al caso de no descargar a la red. Para el Renault Zoe será aproximadamente 13 veces mayor el kilometraje que podrá recorrer el usuario si no descarga su batería hasta el 10 % en V2G. En el caso de la Kangoo ZE 33 se podrá recorrer 8 veces más kilometraje y con el VE E-Up! 2 veces más. En el capítulo 13 se analizará el impacto del deterioro de la batería en conjunto con el impacto monetario.

Al analizar cómo optimizar el uso de la batería según el algoritmo implementado (ver 7.4), se concluye que la batería tiene una mayor vida útil si se utiliza en intervalos pequeños de DOD y aumenta aún más, si se utiliza en intervalos de SOC bajos. A modo de ejemplo, según los resultados obtenidos (ver tabla 12.13), para el Renault Zoe, si realizamos el mismo ciclo Estándar, pero considerando distintos SOC iniciales, se tendrá que la vida útil de la batería puede extenderse 3 veces más si dicho ciclo Estándar se realiza desde un SOC inicial del 50 % y 6.4 veces más si se comienza con un del SOC 30 %, esto es siempre comparando frente al caso de comenzar con un SOC del 100 %.

A fin de cuentas, la batería sufrirá mayor deterioro a mayor DOD. Si bien el Crate afecta al deterioro de las baterías, para el modelo determinado, los vehículos trabajados y el algoritmo del SOH implementado, los Crates (típicamente menores a 0.5) no tienen tanto peso como para inclinar la balanza en cuanto al número de ciclos que determina el fin de la vida útil de las baterías (tal como se desarrolló en la sección 12.3.2). También se optimiza la vida útil de la batería si se evita trabajar a SOC altos. Por lo tanto, una buena gestión de carga implicaría cargar la batería lo suficiente para realizar únicamente los recorridos diarios (como se estudió en en punto 12.3.3).

14.5. Rentabilidad económica

Al analizar la rentabilidad económica de la adquisición de un vehículo eléctrico en comparación con un vehículo de combustión interna (ICE), es necesario conocer si es posible compensar la diferencia de costo que se tiene al realizar la inversión inicial debido al valor de adquisición del VE en relación al ICE. Con el análisis realizado en el capítulo 13, para el estudio de recuperación sin inyección de energía a la red o el hogar, el mayor peso en la ecuación de recuperación del capital está relacionado con la diferencia en el costo de la energía que impulsará los vehículos. Las ecuaciones y estimaciones realizadas consideran dos ahorros, uno por la energía que impulsará al coche y otro por mantenimiento. En el año cero, realizando 39.3 km diarios con la Renault Kangoo 33 (que es el caso de menor ahorro), se recuperarán \$ 50 666 (\$4 222 mensuales, ver tabla 13.2) en ahorro de energía, y \$ 4 575 anuales en mantenimiento (ver sección 13.2.2). Por lo tanto, la carga tarifaria para el cargo de energía, descrita en 13.1.1, y su relación con el costo de los combustibles (sección 13.1.2) es favorable para implementar e incentivar la movilidad eléctrica en Uruguay.

En la tabla 13.3 se observa cómo se incrementa la rentabilidad del vehículo eléctrico a medida que aumenta el kilometraje diario recorrido. Para la Renault Kangoo 33, el efecto de pasar de 39.3 km diarios a 157.2 km diarios hace pasar de un ahorro en el año cero de \$ 55 242 a \$ 207 115 y de un tiempo de recuperación de la inversión inicial entre un VE y un ICE de 10.4 años a 3.6 años. Para el Zoe, se aprecia el mismo efecto, pasando de un ahorro de \$ 56 100 a \$ 210 595 en el año cero y bajando el tiempo de repago de 6.2 años a 1.9 años. Si se contempla la diferencia de ahorro en el año cero para los mencionados valores, el Zoe aventaja al Kangoo en un 1.6 % aproximadamente. Se concluye entonces que los menores tiempos de repago del Zoe están vinculados a la diferencia de inversión inicial entre los VEs y los ICEs seleccionados para la comparativa. Al disminuir la brecha de costos, será cada vez más atractiva la adquisición de un vehículo eléctrico, es por esto, que las medidas de incentivo mencionadas en 13.2.3 asumirán también un papel importante en el impulso del desarrollo de la movilidad eléctrica.

A pesar de que el Zoe tiene más capacidad de almacenamiento que la Kangoo (41 kWh utilizables frente a 31 kWh), el ahorro anual está relacionado con el consumo y el kilometraje diario realizado. En lo que influirá el tamaño de la batería será en la vida útil de la misma. Como se analiza en la sección 12.3.2, el DOD es uno de los factores de mayor peso en la degradación de la batería, por lo tanto cuanto mayor energía tenga la batería, menor será el DOD que se le aplique a la batería al recorrer un trayecto establecido, de manera que tendrá mayor vida útil con este uso y en consecuencia se podrá utilizar durante más años con el fin de generar más utilidad.

Los estudios relacionados con el SOH de los vehículos (para el capítulo 13) fueron realizados con descargas a partir de un 100 % del SOC. Como se destaca a lo largo de este trabajo, una gestión más inteligente de la batería implicaría

Capítulo 14. Conclusiones

efectuar las descargas desde niveles de SOC inicial menores, como fue detallado para un ciclo Estándar en la sección 12.3.5. Al trabajar en intervalos de SOC menores, la vida útil de las baterías se prolonga (ver secciones 7.4.4.1 y 12.3.5). Cuanto mayor sea la vida útil del vehículo, se hará más rentable la inversión.

Como se mencionó anteriormente, para el caso del Renault Zoe, la recuperación de la inversión pasa de 6.2 años a 1.9 años en caso que el kilometraje diario recorrido por el vehículo sea de 39.3 km y 157.2 km diarios, respectivamente. Según el software implementado para este proyecto, al realizar 157.2 km diarios, la batería del Zoe rinde 3023 ciclos hasta llegar al 80 % de su vida útil, que son aproximadamente 8.3 años. Debido a esto, se puede afirmar que a partir de los 1.9 años se comienza a generar un superávit, el cual se podrá aprovechar hasta los 8.3 años. Al llegar a ese tiempo se habrán ahorrado aproximadamente (según las ecuaciones planteadas en el Cap. 13) unos US\$ 65 690, de los que hay que descontar la inversión inicial de US\$ 12 028 de diferencia (en este caso) entre el ICE y el VE para obtener la ganancia total. Entonces, recorriendo 157.2 km diarios durante la vida útil de la batería del Zoe se ganarían (en comparación con haber comprado el vehículo ICE) US\$ 53 662, dinero suficiente para adquirir un nuevo vehículo (ver sección 13.2).

Al considerar el caso de descarga contra la red (V2G), los tiempos de repago (mostrados en la tabla 13.5) disminuyen considerablemente respecto al caso en que no se considera la gestión de la carga como alternativa (ver tabla 13.3). En la figura 13.1 puede observarse la diferencia entre las curvas con V2G y sin V2G, observando la ganancia que aporta el V2G para cada vehículo. Cuanto menor es el kilometraje diario recorrido, mayor será el ahorro inducido por el V2G, ya que se dispondrá de mayor energía para diferir desde la Punta a Fuera de Punta. Entonces, el peso del V2G en la ecuación del ahorro caerá a medida que se recorran más kilómetros diariamente.

Al simular los distintos recorridos diarios seguidos de una descarga V2G hasta el 10 % del SOC, se obtiene del software implementado el número de ciclos que marcarán el deterioro de la batería hasta un 80 % de su capacidad nominal. Tanto para el Renault Kangoo como para el Zoe, el resultado es de aproximadamente 5 años de vida (equivalentes a 60 meses o 1800 ciclos diarios).

Para el Renault Zoe, con el recorrido de 39.3 km diarios e implementando V2G, a los 5 años se tendrá una ganancia de US\$ 22 300 (ver figura 13.3). La diferencia inicial de adquisición entre un Zoe y un Clio a combustión es de US\$ 12 028, por lo tanto, al año 5 se tiene un superávit de US\$ 10 272. Este capital es suficiente para reemplazar la batería (según las estimaciones de 13.4), cuyo costo es de aproximadamente US\$ 8 379. Entonces, si se sustituye la batería, se tendrán 5 años más de vida al mismo uso, obteniendo una ahorro total (desde el año cero) de US\$ 53 590, del que se deben descontar para obtener el balance al año 10, la diferencia de inversión inicial y el costo de la batería sustituida en el año 5, por lo tanto, al año 10 se tendrá un superávit de US\$ 33 183. En caso de no haber utilizado V2G, a los 10 años se tendría un superávit de US\$ 10 692 (ver figura
13.3). Por lo tanto, para el Renault Zoe, el hecho de realizar V2G triplica las ganancias de un usuario que realiza 39.3 km diarios, comparando con el caso sin V2G.

Conocer el costo exacto de los automóviles y de sus baterías en Uruguay hubiese hecho el cálculo más preciso. Cuando el mercado permita conocer los valores concretos, las comparaciones serán determinantes.

Será importante conocer las reglamentaciones locales en cuanto a la conexión de los vehículos a la red o al hogar. No sólo para el diseño de las instalaciones sino también para la evaluación económica que pueda realizar cada usuario al momento de adquirir un coche eléctrico. En la medida que se regulen los tipos de uso variarán los tipos de análisis que se puedan realizar.

Un análisis de la vida secundaria, por ejemplo, para utilizar las baterías como acumuladores estacionarios luego de llegar a un SOH del 80 %, mejoraría la ecuación económica sacándoles rédito financiero cuando ya no sean útiles para la alimentación del vehículo eléctrico.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 15 Trabajo a futuro

El presente proyecto deja implementada una herramienta de modelado que podrá ser utilizada y mejorada por múltiples actores. Durante el desarrollo de la misma surgieron grandes ideas que no pudieron ser implementadas, entre otras variables, por el tiempo del que se disponía para avanzar. Se podrán incorporar tantos vehículos como el usuario quiera simular y tantos ciclos de conducción como se puedan relevar. Hubiese sido del agrado del grupo (y era la idea primaria), el agregar más algoritmos de estimación del SOH para poder comparar estudios. Fue difícil encontrar trabajos aplicables a los requerimientos del proyecto, ya que muchos de los algoritmos están pensados para relevar el SOH en base a mediciones en baterías reales. Con el tiempo y la relevancia que irá tomando el estimar el SOH de las baterías en vehículos eléctricos y otras aplicaciones, se tendrá más material accesible que permitirá implementar más códigos.

En caso de que en la UdelaR se implemente un laboratorio de ensayo de baterías, se podrán obtener valores relevantes de esta herramienta para el dimensionado de los ensayos, como pueden ser el Crate (se recomienda bajo valor de Crate, entre $0.1C \ge 0.5C$) al que se descarga la batería típicamente.

De adquirir un potenciostato para realizar ensayos de laboratorio sobre baterías a escala (como era la idea primaria de este proyecto), el modelo se podrá ajustar para simular la química y la escala de las baterías que se disponga o se deseen comprar. En la medida que se releven valores reales de los tipos de celda particulares que se utilicen, se podrá enriquecer el modelo para que continúe creciendo.

Los ajustes de los vehículos continuarán mejorando en la medida que se puedan realizar más pruebas reales. En las mismas, se seguirán adicionando ciclos de conducción que podrán servir para identificar los perfiles de los conductores y los caminos uruguayos. Se sugiere implementar un ciclo de conducción que incorpore ruta, u otros recorridos que puedan realizar personas que viven en las cercanías de Montevideo. Como fue visto y analizado, la conveniencia del vehículo eléctrico aumenta a medida que se recorren más kilómetros por día, ya que la principal ventaja está en la diferencia de costos de la energía que impulsa el VE y el vehículo

Capítulo 15. Trabajo a futuro

a combustión interna.

Se deberá continuar realizando estudios de conveniencia en la medida que aumenten los datos sobre los vehículos eléctricos que desembarcarán en Uruguay y se conozcan efectivamente sus costos de venta al público.

También sería conveniente desarrollar un nuevo modelo (o modificar el existente) que permita realizar simulaciones con vehículos pesados. Esto podrá ser de gran utilidad para el desarrollo de la movilidad eléctrica, en particular para simular ómnibus y camiones, con sus ciclos de conducción particulares. Apéndice A

Datos técnicos de los vehículos utilizados en las simulaciones

Vehículo	Renault Kangoo	Nissan Leaf	Renault Zoe	BYD E6	Volkswagen e-UP!	Renault Kangoo 33
Potencia (kW)	44	80	80	00	61	44
Torque (Nm)	226	254	225	450	210	225
Voltaje batería (V)	360	360	345.6	307	374	345.6
Energía (kWh)	22	24	41	61	18.7	33
Capacidad (Ah)	65	58.02^{-1}	114.8^{1}	210	49.3^{1}	43.4^{1}
Configuración	96s2p	96s2p	96s2p	96s1p	102s2p	96s2p
Química	LMO	LMO	NMC	LFP	NMC	NMC
Masa en vacío (kg)	1553	1474	1575	2380	1139	1553
Rodado	195/65 R15	$205/55 { m R16}$	$195/55 \ \mathrm{R16}$	$235/65 \mathrm{~R17}$	$165/65 \mathrm{R15}$	195/65 R15
Relación de transmisión	$9.05 \ ^{1}$	7.94	8.83^{1}	6.57^{1}	8.16	10.3^{1}
Velocidad máx. (km/h)	130	144	135	140	130	130
RPM máx.	10500	10500	10886	7000	12000	12000
Forma del vehículo (Cd)	0.3	0.291	0.29	0.29	0.31	0.3
Área frontal (Af)	2.3	2.27	2.59	2.3	2.09	2.3

Tabla A.1: Tabla extendida con principales características de los vehículos eléctricos utilizados en las simulaciones.

Apéndice A. Datos técnicos de los vehículos utilizados en las simulaciones

Los valores de la tabla anterior, correspondientes a "Relación de transmisión", para el caso en que deban ser calculados $(^1)$, se calculan como:

$$relac.transm. = \frac{\frac{(RPMmax)\pi}{30} * radiorueda}{\frac{Velmax(km/h)}{3,6}}$$
(A.1)

De manera de no sobrecargar la tabla, se indican a continuación las referencias de donde se obtuvieron los datos de la tabla 4.2.

Renault Kangoo: [49] [23] [111] [112]. Nissan Leaf: [54] [113] [114] [115] [116]. Renault Zoe: [55] [56] [117] [118] [119] [120]. BYD E6: [57] [58] [52] [82] [121] [19] [122] [123]. Volkswagen e-UP!: [59] [60] [124] [125]. Renault Kangoo 33: [87] [126] [127] [128].

 $^{^{1}\}mathrm{Calculado}$ en base a datos anteriores

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice B

Conversión de autonomía ciclo NEDC a WLTP

Con el fin de poder comparar las autonomías de los vehículos, es necesario contar con todos los datos de sus autonomías para los ciclos NEDC y WLTP.

Tal como fue explicado en el capítulo 6, los vehículos cuyos modelos sean anteriores al 1ero de Setiembre de 2018 no están obligados a testear bajo el ciclo WLTP. Debido a esto es necesario buscar una alternativa de manera de poder estimar con éxito los casos de vehículos estudiados que no tienen certificado de autonomía bajo ciclo WLTP.

Para realizar esto, la evaluación se basa en un estudio [129] que trata la conversión de ciclos WLTP y NEDC a ciclos EPA (ciclo de conducción utilizado en EEUU, realizado por la Agencia de Protección del Medio Ambiente).

De dicho estudio surge que la relación promedio NEDC/EPA es 1.43 con una desviación estándar de 0.161. Por lo tanto, se puede convertir de NEDC a EPA, dividiendo el valor NEDC por 1.43 con un error del 11 %.

Por otro lado, la relación promedio WLTP/EPA es 1.12 con una desviación estándar de 0.092. Por lo tanto, se puede obtener el valor en el ciclo EPA a partir del WLTP con un error del 8%.

Utilizando lo anterior, se llega a la siguiente relación entre NEDC y WLTP:

$$WLTP = NEDC * 0,783$$

Esta relación es la utilizada en la presente documentación cuando se indica que el valor de WLTP es un "valor estimado".

A modo de poder corroborar lo anterior y evaluar su validez, a partir de los datos oficiales para vehículos que cuentan con autonomías NEDC y WLTP, se comprueba el valor obtenido utilizando la relación anterior.

Los resultados se muestran la tabla B.1:

Vehículo	Batería (kWh)	Autonomía WLTP (km)	Autonomía NEDC (km)	Conversión a WLTP (km)	Error
BMW i3	33	225	300	234.9	4.40%
Opel Ampera	60	380	520	407.2	7.1%
Renault Zoe	41	300	403	315.5	5.2%
VW e-Golf	35.8	219	300	234.9	7.3%
Nissan Leaf	40	285	378	296.0	3.9%
Kia Soul	30	185	250	195.8	5.8%
Hyundai Ioniq	28	204	280	219.2	7.5%

Apéndice B. Conversión de autonomía ciclo NEDC a WLTP

Tabla B.1: Comparación de valores estimados y reales de WLTP. Los valores fueron obtenidos de [130].

Los valores indicados en la columna "Conversión a WLTP" corresponden a multiplicar el valor de autonomía dada por el fabricante (en la columna "Autonomía NEDC (km)") por 0.783. La columna "Error" determina la diferencia entre el valor estimado de WLTP y el valor real dado por el fabricante (indicado en la columna "Autonomía WLTP (km)").

De lo anterior surge que el error máximo obtenido es de 7.5%, por lo que es aceptable utilizar esta conversión para obtener el ciclo WLTP a partir del dato del ciclo NEDC. Esta conversión sólo será utilizada en los vehículos que tengan ningún dato de autonomía para ciclo WLTP.

Se debe remarcar que esta estimación es únicamente realizada para saber que tan válidos son los valores obtenidos luego de las simulaciones.

El lector debe recordar que el ciclo NEDC y WLTP difieren en varios aspectos (distancia, velocidad promedio, velocidad máxima, temperatura, potencia requerida por el motor, cantidad de frenadas y aceleraciones, entre otros) por lo que su comparación no es tan simple. Esta conversión fue únicamente realizada a modo orientativo para determinar si los valores obtenidos en las simulaciones están dentro de lo esperado o no.

- BEN (Balance Energético Nacional). Emisiones de co2. https://ben.miem. gub.uy/caracteristicas3.html, 2017.
- [2] Endesa. Coches eléctricos para salvar el planeta. https://endesavehiculoelectrico.com/ coches-electricos-para-salvar-el-planeta/.
- [3] IEA International Energy Agency. Estadísticas emisiones co2. https:// www.iea.org/statistics/co2emissions/.
- [4] Forbes. How much oil does the world have left? https://www.forbes.com/sites/judeclemente/2015/06/25/ how-much-oil-does-the-world-have-left/#3e3b8ea95b1f.
- [5] Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Acuerdo de parís. https://www.mvotma.gub.uy/internacional/item/ 10010212-acuerdo-de-paris.
- [6] Martin Mora; Sergio Santana; Gaston Hernandez. Autos híbridos y eléctricos, 2010.
- [7] Híbridos Eléctricos. diferen-Así funcionan las у tecnologías de vehículos eléctricos. https:// tes www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/ asi-funcionan-diferentes-tecnologias-vehiculos-electricos/ 20180921183150021994.html.
- [8] Fun to drive. Electric cars technology comparison. https://funtodrive.net/ a-comparison-of-electric-vehicles-hybrid-bev-phev-and-fcev-versions/.
- [9] Xataka. El coche de hidrógeno competencia real. https://www.xataka.com/automovil/ el-coche-de-hidrogeno-vs-el-coche-electrico-la-competencia-por-ser-la-motor:
- [10] Máquinas térmicas. El motor de 4 tiempos. https://sites. google.com/site/maquinastermicas3d/4-combustion-externa/ 4-1-el-motor-de-4-tiempos.

- [11] Electric Vehicle Database. Renault kangoo maxi ze 33. https:// ev-database.org/car/1101/Renault-Kangoo-Maxi-ZE-33, 2019.
- [12] Electric Vehicle Database. Renault zoe r110. https://ev-database.org/ car/1128/Renault-Zoe-R110, 2019.
- [13] Curso edX. Electric cars technology. https:// courses.edx.org/courses/course-v1:DelftX+eCARS2x+ 1T2018/courseware/e2e87bc433c947ef857e046f019243ac/ ceb13b0f1c2d4fc8b83d3d0cfa04e629/2?activate_block_id=block-v1, 2018.
- [14] Curso edX. Electric cars technology. https://
 courses.edx.org/courses/course-v1:DelftX+eCARS2x+
 1T2018/courseware/e2e87bc433c947ef857e046f019243ac/
 c5b47c772503470dad60773dd7f80a6b/2?activate_block_id=block-v1%
 3ADelftX%2BeCARS2x%2B1T2018%2Btype%40vertical%2Bblock%
 400b9144aa91104290b98e159f918ebdcf, 2018.
- [15] Funcionamiento de motores de cc motor, motores, electricidad, electrotrecnia. https://gfycat.com/graveimmaterialcaribou, 2017.
- [16] Curso edX. Electric cars technology. https://
 courses.edx.org/courses/course-v1:DelftX+eCARS2x+
 1T2018/courseware/e2e87bc433c947ef857e046f019243ac/
 a242b18eeed94c0db430bb323d40fc23/2?activate_block_id=block-v1%
 3ADelftX%2BeCARS2x%2B1T2018%2Btype%40vertical%2Bblock%
 409075a9c425614229a5cd2192df5c720b, 2018.
- [17] Curso edX. Electric cars technology. https:// courses.edx.org/courses/course-v1:DelftX+eCARS2x+ 1T2018/courseware/e2e87bc433c947ef857e046f019243ac/ a242b18eeed94c0db430bb323d40fc23/2?activate_block_id=block-v1% 3ADelftX%2BeCARS2x%2B1T2018%2Btype%40vertical%2Bblock% 409075a9c425614229a5cd2192df5c720b, 2018.
- [18] Curso edX. Electric cars technology. https:// courses.edx.org/courses/course-v1:DelftX+eCARS2x+ 1T2018/courseware/e2e87bc433c947ef857e046f019243ac/ a242b18eeed94c0db430bb323d40fc23/2?activate_block_id=block-v1% 3ADelftX%2BeCARS2x%2B1T2018%2Btype%40vertical%2Bblock% 409075a9c425614229a5cd2192df5c720b, 2018.
- [19] BYD. Byd e6 brochure. https://www.unicmar.ro/wp-content/uploads/ 2018/01/20151124-e6-brochure-ENG.pdf.
- [20] BYD Ecuador. Byd t3. https://bydelectrico.com/ vehiculos-industriales/van-electrica/.

250

- [21] Emma Arfa Grunditz. Design and assessment of battery electric vehicle powertrain, with respect to performance, energy consumption and electric motor thermal capability, 2016.
- [22] JAC Motors. Jac s2. https://jacen.jac.com.cn/showroom/iev6s.html.
- [23] Renault. Renault kangoo ze finalized designs revealed. http://large. stanford.edu/courses/2010/ph240/smillie1/docs/renault.pdf.
- [24] Renault. Renault zoe. https://www.cdn.renault.com/content/dam/ Renault/IE/Brochures/Vehicles/zoe-brochure-november.pdf, 2018.
- [25] Chengming Zhang. System efficiency improvement for electric vehicles adopting a pmsm. https://pdfs.semanticscholar.org/228e/ c1367f0dd5d8901bc3e301ae3ecc12307f6b.pdf.
- [26] Curso edX. Electric cars technology. https:// courses.edx.org/courses/course-v1:DelftX+eCARS2x+ 1T2018/courseware/e2e87bc433c947ef857e046f019243ac/ 6433715aa7f7401da991afefdf34fd89/2?activate_block_id=block-v1% 3ADelftX%2BeCARS2x%2B1T2018%2Btype%40vertical%2Bblock% 40a8a31bf5d06146638b2827973da9dd70, 2018.
- [27] Curso edX. Electric cars technology. https:// courses.edx.org/courses/course-v1:DelftX+eCARS2x+ 1T2018/courseware/41324efa47934f82be3725bddff1503f/ 1d7d40a9e8644e3099c3053a0aa9a2c3/2?activate_block_id=block-v1% 3ADelftX%2BeCARS2x%2B1T2018%2Btype%40vertical%2Bblock% 40ba332e5a6836494f8506a89fef13c233, 2018.
- [28] IEC 61851-1. International standard, 2017.
- [29] IEC 61851-1. International standard, 2017.
- [30] Curso edX. Electric cars technology. https:// courses.edx.org/courses/course-v1:DelftX+eCARS2x+ 1T2018/courseware/41324efa47934f82be3725bddff1503f/ 0733f4d3845c43e79d3b92331aa044cf/2?activate_block_id=block-v1% 3ADelftX%2BeCARS2x%2B1T2018%2Btype%40vertical%2Bblock% 4041fcdc83da234d6d8c7f42120ca59277, 2018.
- [31] D.Linden y Thomas B. Reddy. Handbook of batteries, 3rd ed., mcgrawhill, 2002.
- [32] DIARIO MOTOR. Baterías coches de eléctricos e híbridos, hov estado de la tecnología del automóvil]. https://www.diariomotor.com/tecmovia/2012/03/14/ baterias-de-coches-electricos-e-hibridos-hoy-estado-de-la-tecnologia-del-aut
- [33] T.R. Crompton. Battery reference book, third edition, 2000.

- [34] Carlos Armenta. Conferencia baterÍas para vehÍculo elÉctrico, para seminario de movilidad eléctrica organizado por cugre, 2018.
- [35] Battery University. Types of lithium-ion. https://batteryuniversity. com/learn/article/types_of_lithium_ion.
- [36] Wei Wang Daiwon Choi. Material challenges and perspectives. https://www.researchgate.net/publication/241909591_Material_ Challenges_and_Perspectives, 2010.
- [37] Battery University. Lithium-ion shapes. https://batteryuniversity. com/learn/article/types_of_battery_cells.
- [38] Torbjörn Thiringer Evelina Wikner. Extending battery lifetime by avoiding high soc, 2018.
- [39] Shuai Maa1; Modi Jianga; Peng Taoa. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries. https://batteryuniversity.com/learn/ article/types_of_battery_cells, 2018.
- [40] Hipertextual. Cómo afectan el frío y las altas temperaturas a la autonomía de los coches eléctricos. https://hipertextual.com/2019/03/ frio-altas-temperaturas-autonomia-coches-electricos.
- [41] Carolina Morente Fernández. Análisis y modelado de baterías en vehículos eléctricos. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/ 23050/TFG_Carolina_Morente_Fernandez.pdf, Leganés, 2015.
- [42] Bolun Xu; Alexander Oudalov. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment. https://www.researchgate.net/publication/ 303890624_Modeling_of_Lithium-Ion_Battery_Degradation_for_ Cell_Life_Assessment, 2016.
- [43] Autosolar. Etapas de carga de una batería. https://autosolar.es/blog/ aspectos-tecnicos/etapas-de-carga-de-una-bateria.
- [44] Battery University. Charging lithium-ion. https://batteryuniversity. com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries.
- [45] MIT EcoInventos. Baterías de litio-azufre. https://ecoinventos.com/ baterias-de-litio-azufre-los-electrodos-hibridos-hacen-el-milagro/.
- [46] ADSLZone. 'al-aire', baterías con 10 veces más autonomía que las de litio. https://www.adslzone.net/2017/01/22/ al-aire-baterias-10-veces-mas-autonomia-las-litio/.
- [47] MotorPasión. Qué son las baterías de estado sólido y por qué son el futuro del automóvil. https://www.motorpasion.com/industria/ que-son-las-baterias-de-estado-solido-y-por-que-son-el-futuro-del-automovil.

- [48] Revista de Energía. Las baterías de estado sólido presentan una densidad energética más alta. https://revistardenergia.com/ las-baterias-de-estado-solido-presentan-una-densidad-energetica-mas-alta.
- [49] Auto10.Cocheeléctrico:Renaultkan-gooze.https://www.auto10.com/pruebas/coches-electricos-renault-fluence-ze-y-renault-kangoo-ze/3166.
- [50] Conduce tu ciudad. Kangoo ze. https://www.conducetuciudad.com/es/ vehiculos/coches-electricos/kangoo-ze.
- [51] Russian Automotive Market Research. Renault kangoo ze 33. https://www.napinfo.ru/en/news/commercial-vehicles/ renault-kangoo-z-e-33-received-increased-power-reserve.
- [52] Búsqueda. Llegaron los eléctricos. https://www.busqueda.com.uy/nota/ llegaron-los-electricos.
- [53] Xataka Automóvil. Nissan leaf. https://www.xataka.com/automovil/ nissan-leaf-segunda-generacion-probamos-el-coche-electrico-que-quiere-seguir
- [54] Push EVs. Nissan leaf, especificaciones reales de la batería. https: //pushevs.com/2018/01/29/2018-nissan-leaf-battery-real-specs.
- [55] Wikipedia. Renault zoe. https://en.wikipedia.org/wiki/Renault_Zoe.
- [56] EV Database. Renault zoe r110. https://ev-database.org/car/1128/ Renault-Zoe-R110#charge-table.
- [57] Wikipedia. Byd e6. https://es.wikipedia.org/wiki/BYD_e6.
- [58] Autoblog.com.uy. Ya se anuncian los byd e6 eléctricos. https://www. autoblog.com.uy/2015/01/ya-se-anuncian-los-byd-e6-electricos. html.
- [59] Wikipedia. Vw e-up! https://es.wikipedia.org/wiki/Volkswagen_ e-up!
- [60] Green Car Congress. Volkswagen's first two production battery-electric vehicles debut at frankfurt. https://www.greencarcongress.com/2013/09/ 20130911-vw.html.
- [61] Ali Emadi Mehrdad Ehsani, Yimin Gao. Modern electric hybrid electric, and fcev fundamentals, theory and design, second edition., 2010.
- [62] Battery University. What does elevated self-discharge do? https:// batteryuniversity.com/learn/article/elevating_self_discharge.
- [63] Linjing Zhang Sijia Liu Leyi Wang Poh Chiang Loh Caiping Zhang, Jiuchun Jiang. A generalized soc-ocv model for lithium-ion batteries and the soc estimation for lnmco battery.

- [64] Maik Naumann Holger C. Hesse Andreas Jossen Rolf Witzmann Alexander Zeh, Marcus Müller. Fundamentals of using battery energy storage systems to provide primary control reserves in germany, 2016.
- [65] Lázaro V. Cremades Lluc Canals Casals, Beatriz Amante García. Electric vehicle battery reuse: Preparing for a second life, 2017.
- [66] Jason MacDonald Scott Moura Samveg Saxena, Caroline Le Floch. Quantifying ev battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models, 2015.
- [67] MATLAB MathWorlks. Página principal. https://www.mathworks.com/ products/matlab.html.
- [68] MATLAB MathWorlks. Electric vehicle reference application. https://it.mathworks.com/help/autoblks/examples/ electric-vehicle-reference-application.html.
- [69] Carlos Armenta. Baterías para vehículo eléctrico: Aspectos técnicos y características, 2018.
- [70] The Art of Manliness. How a car's drivetrain works. https://www. artofmanliness.com/articles/gearhead-101-the-drivetrain/, 2018.
- [71] ThePenguin77. Speed logger. Disponible para Android e iOS.
- [72] Iteration Mobile Vialsoft AppshePenguin77. Speedbot. velocímetro gps. Disponible para Android e iOS.
- [73] km77. La capacidad útil de la batería del nissan leaf es de 32 kwh. un 20 https://blogs.km77.com/teletransporte/ la-capacidad-util-de-la-bateria-del-nissan-leaf-es-de-32-kwh-un-20-menos-de-la-capaci 2019.
- [74] Renault. Summary of the battery pack specifications for l38e. http:// media3.ev-tv.me/renaultbatspec.pdf, 2011.
- [75] Renault. Renault zoe. https://www.cdn.renault.com/content/dam/ Renault/IE/Brochures/Vehicles/zoe-brochure-november.pdf, 2018.
- [76] computerhoy. Los 10 coches eléctricos con más autonomía del mercado. https://computerhoy.com/noticias/life/ 10-coches-electricos-mas-autonomia-del-mercado-68695, 2017.
- [77] myvweup. Volkswagen e-up! specs. http://www.myvweup.com/ volkswagen-e-up-specs/, 2015.
- [78] myvweup. Volkswagen e-up! specs. http://www.myvweup.com/ volkswagen-e-up-specs/, 2015.

254

- [79] ev database. Nissan leaf 24 kwh. https://ev-database.org/car/1019/ Nissan-Leaf-24-kWh.
- [80] Renault. Renault fluence z.e. and kangoo express z.e.: Finalized designs revealed and pre-reservations open. http://large.stanford.edu/courses/ 2010/ph240/smillie1/docs/renault.pdf, 2010.
- [81] ev database. Renault zoe r110. https://ev-database.org/car/1128/ Renault-Zoe-R110#charge-table.
- [82] MIEM-UTE. Pruebas de campo byd e6. http://www. eficienciaenergetica.gub.uy/documents/20182/56464/Informe_ ByD_e6.pdf/882f4a5b-53e9-4cfd-a015-84757020e57f.
- [83] ev database. Volkswagen e-up! https://ev-database.org/car/1081/ Volkswagen-e-Up.
- [84] Renault. Renault zoe. https://www.cdn.renault.com/content/dam/ Renault/IE/Brochures/Vehicles/zoe-brochure-november.pdf, 2018.
- [85] Volkswagen. Electric and plug-in hybrid high voltage battery warranty. https://www.volkswagen.co.uk/owners/electric-car-warranty.
- [86] El Observador. Mantener un 0km de usd20.000. https://www.elobservador.com.uy/nota/ para-mantener-un-0-km-de-us-20-mil-hay-que-ganar-al-menos-43-mil-al-mes-201
- [87] Renault Pro+. Renault kangoo brochure. https://www.cdn.renault.com/ content/dam/Renault/AR/brochures/KQ2/_ebrochure.pdf.
- [88] Weishan Li. A novel electrolyte with the ability to form a solid electrolyte interface on the anode and cathode of a limn2o4/graphite battery. https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/ta/ c3ta13067c/unauth#!divAbstract, 2013.
- [89] ERIK BJÖRKLUND. Avoiding ageing surface degradation of commercial electrode materials in lithium-ion batteries, 2019.
- [90] UTE. Pliego tarifario. https://portal.ute.com.uy/sites/default/ files/docs/Pliego%20Tarifario%20Vigente.pdf, 2019.
- [91] UTE Movilidad Eléctrica. Tarifas, 2019.
- [92] ANCAP. Página principal. https://www.ancap.com.uy/, 2019.
- [93] Presicencia de la República. Página principal. https://www.presidencia. gub.uy/.
- [94] ANCAP. Precios combustibles. https://www.ancap.com.uy/ innovaportal/v/2093/1/innova.front/precios-combustibles.html\, 2019.

- [95] ev database.org. Electric vehicle database. https://ev-database.org/.
- [96] Carmax. Clio iv. https://www.carmax.com.uy/renault/clio-iv-2/.
- [97] Nissan España. ¿por qué un eléctrico nissan? https: //www.nissan.es/experiencia-nissan/nissan-electric/ por-que-un-electrico-Nissan/incentivos.html.
- [98] Nissan España. Ahorros del vehículo eléctrico vs. vehículo de combustión. http://serviciosweb.nissan.es/vehiculos-electricos/html/ coo/index.html.
- [99] Semanario Búsqueda. Página principal. https://www.busqueda.com.uy/.
- [100] UTE. Movilidad eléctrica—miem. https://www.miem.gub.uy/energia/ movilidad-electrica, 2018.
- [101] Energía y Minería Ministerio de Economía y Finanzas, Ministerios De Industria. Decreto 246-012. http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/ documents/20182/22856/Decreto246-012_Imesi_Vehiculos_mef1786. pdf/197746ff-2de5-43e4-a8f3-ee3ecae1323f.
- [102] Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca Ministerios De Industria Energía y Minería Ministerio de Deporte y Turismo Ministerio de Economía y Finanzas, Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. Decreto 02/12. http://comap.mef.gub.uy/innovaportal/file/1671/1/ 20120203_dec_2_12.pdf.
- [103] Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) y el Ministerio de Vivienda. Proyecto movés. https://www.miem.gub.uy/energia/ proyecto-moves-movilidad-urbana-eficiente-y-sostenible.
- [104] El Observador. La inflación se moderó y se cerró en 7.4% interanual. https://www.elobservador.com.uy/nota/ la-inflacion-se-modero-y-cerro-enero-en-7-4-interanual--20192517832, 2019.
- [105] Banco Central del Uruguay. Cotizaciones. https://www.bcu.gub.uy/ Estadisticas-e-Indicadores/Paginas/Cotizaciones.aspx, 2019.
- [106] Renault España. Autonomía, batería y recarga zoe. https://www. renault.es/electricos/zoe/bateria.html, 2019.
- [107] Autocasión. Alquilar o comprar las baterías de un coche eléctrico: ¿qué es mejor? https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/ alquilar-o-comprar-las-baterias-de-un-coche-electrico-que-es-mejor.
- [108] movilidadeléctrica.com. Nuevo renault zoe ze 40: batería en propiedad y programa de sustitución. https://movilidadelectrica.com/ nuevo-renault-zoe-ze-40/.

- [109] Renault España. Autonomía y recarga renault kangoo z.e. https://www. renault.es/electricos/kangoo-ze/bateria.html.
- [110] forococheselectricos.com. Nueva renault kangoo ze. batería de 33 kwh, 270 kilómetros de autonomía, y sin subida de precio. https://forococheselectricos.com/2017/06/ nueva-renault-kangoo-ze-bateria-de-33-kwh-precio.html.
- [111] Renault. Summary of the battery pack specifications. http://media3. ev-tv.me/renaultbatspec.pdf.
- [112] Foro EV. Renault kangoo ze, características generales. http://foroev. com/index.php?topic=43.0.
- [113] L. David Roper. Diary of a nissan leaf owner. http://www.roperld.com/ science/NissanLeaf.htm.
- [114] Electric Vehicle Wiki. Nissan leaf battery specs. http://www. electricvehiclewiki.com/wiki/battery-specs/.
- [115] Motorflash. Nissan leaf 5p 109 cv visia 24 kwh flex. https: //configurador.motorflash.com/tm_ficha.php?id=720298520160401& fecha=20160401&mercado=es&site=motorflashback&impresion=true.
- [116] Aficionados a la mecánica. Coche eléctrico, baterías. http://www. aficionadosalamecanica.com/coche-electrico_bateria.htm.
- [117] Bruno Delobel. Zoe battery durability, field experience and future vision. http://cii-resource.com/cet/AABE-03-17/Presentations/BMGT/ Delobel_Bruno.pdf.
- [118] Push EVs. Renault zoe ze40 full battery specs. https://pushevs.com/ 2019/02/10/renault-zoe-ze-40-full-battery-specs/.
- [119] LTD Yunergy Bayyery Co. Lg polymer lithium battery e63. http://www. yunergybattery.com/productshow.asp?id=756#.XNnMOo5KjIV.
- [120] LG Chem. Automotive batteries. https://www.lgchem. com/global/vehicle-battery/car-batteries-Different/ product-detail-PDEB0002.
- [121] BYD. Aplication for certification: Byd e6. https://iaspub.epa.gov/ otaqpub/display_file.jsp?docid=33966&flag=1.
- [122] Lixin Miao Bin Ye. Feasibility study of a solar-powered electric vehicle charging station. https://www.mdpi.com/1996-1073/8/11/12368/htm, 2015.
- [123] Boryann Liaw Gianfranco Pistoia. Behaviour of lithium-ion batteries, 2018.
- [124] Push EVs. More info about the volkswagen electric triplets. https://pushevs.com/2018/10/04/ more-info-about-volkswagen-electric-triplets/.

- [125] eSK8 Builders. Volkswagen-e-up-li-ion-cells. https://www. electric-skateboard.builders/t/volkswagen-e-up-li-ion-cells/ 52713/3.
- [126] Somos Eléctricos. Renault kangoo ze. https://somoselectricos.com/ marcas-vehiculos-electricos/renault/kangoo-ze/.
- [127] Motorflash. Renault kangoo z.e. maxi z.e. https://configurador. motorflash.com/tm_ficha.php?id=775785020171001&fecha=20171001& mercado=es&site=motorflashback&impresion=true.
- [128] EV Database. Renault kangoo maxi ze 33. https://ev-database.org/ car/1101/Renault-Kangoo-Maxi-ZE-33#charge-table.
- [129] David Roper. Compare ev range figures. https://insideevs.com/features/343231/ heres-how-to-calculate-conflicting-ev-range-test-cycles-epa-wltp-nedc/, 2019.
- [130] Coches.net. Comparativo de autonomía real de coches eléctricos. https: //www.coches.net/videos/vehiculos-electricos-autonomia-real.

Índice de tablas

3.1.	Comparación de potencia específica, densidad de potencia y eficien- cia entre los VE y los ICE.	16
3.2.	Comparación de rendimientos entre EVs y un vehículo de combus-	
	tion interna. * Se asume que el vehículo ICE tiene un rendimiento de 14 km/l.	
	** Se asume la densidad energética volumétrica de la gasolina en	
	9000 Wh/l	17
3.3.	Comparación energía específica de la gasolina frente a los diferentes tipos de baterías [13]	17
3.4.	Distintos tipos de motores utilizados en vehículos eléctricos actuales.	25
4.1.	Tipos de baterías, particularidades y nivel de adaptación para Vehículos Eléctricos [34].	55
4.2.	Principales características de las baterías de litio según su química.	62
5.1.	Principales características de los vehículos eléctricos utilizados en las simulaciones.	74
6.1.	Etapas del Ciclo WLTP	77
6.2.	Clases del Ciclo WLTP	77
7.1.	Valores de resistencias de rodadura f_r	86
7.2.	Coeficientes de rozamiento promedio en varios tipos de superficies.	91
7.3.	Dependencia del SOC y la temperatura para el parámetro d, a un Crate de 2C	104
11.1.	. Comparación autonomía del fabricante vs autonomía simulada. * Valor estimado según el procedimiento indicado en el apéndice B.	182
11.2.	. Comparación tiempo de carga del fabricante vs tiempo de carga simulado.	
	* Carga del 0 al 100 % a corriente constante. No utiliza etapas de ecualización	183
11.3.	. Comparación entre la garantía de la batería del fabricante en km y	105
	ia simulación de la vida util de la bateria para uso en un VE	199

Índice de tablas

12.1. Comparación entre las autonomías de los Ciclos NEDC, WLTP y	100
	188
12.2. Electo de considerar la pendiente en la autonomía para el ciclo NEDC.	189
12.3. Electo de considerar la pendiente en la autonomía para el ciclo WLIP.	189
12.4. Efecto de considerar la pendiente, en el ciclo Montevideo en la au-	190
12.5 Evigencia del vahícula en conguma dilemetraja targua y potencia	109
(en promedio del valor absoluto) del motor	103
12.6 Bendimientos en kWh/km según ciclos NEDC. WLTP y Montevideo	195 10/
12.0. rendumientos en kwir/km segun cleios relibe, will'r y Montevideo.	101
ciclo Montevideo.	196
12.8. Autonomías v ciclado para la Kangoo ZE Maxi de 33 kWh	201
12.9. Resultados luego de realizar un ciclo Estándar.	201
12.10 Resultados de realizar un ciclo Estándar por día, cargando la batería	-
cada 2 días. \ldots	205
12.11Resultados de realizar un ciclo Estándar por día, cargando la batería	
cada 3 días	205
12.12Resultados de realizar un ciclo Estándar y entregar la energía re-	
manente a la red. \ldots	207
$12.13 {\rm Cantidad}$ de ciclos y rendimiento de la vida útil de la batería para	
cada vehículo según el SOC inicial con el que se comience para	
iguales DOD en el ciclo Estándar	208
13.1. Comparativa en costo de adquisición de un VE vs un ICE en Uru-	
guay (Renault Kangoo ZE vs Renault Kangoo v Renault Zoe vs	
Renault Clio)	214
13.2. Comparativa de costos mensuales en el consumo de energía entre	
VEs e ICEs según kilometraje diario recorrido	215
13.3. Repago de diferencia de inversión inicial en la adquisición de VE v s $$	
un ICE	218
13.4. Ahorro asociado a diferir el consumo de energía desde la Punta	
a Fuera de Punta utilizando la energía remanente disponible para	
V2G en el vehículo según el recorrido diario realizado	220
13.5. Repago de diferencia de inversión inicial en la adquisición de VE vs	001
un ICE incorporando V2G	221 000
13.0. Alquier de baterías para el Renault Zoe [100]	222 000
13.7. Alquier de baterias para el Renault Kangoo ZE 33 [109]	223
un ICE utilizando la ecuación 13.5	<u> </u>
13.9 Benaro de diferencia de inversión inicial en la adquisición de VE vs	<u>-</u>
un ICE con V2G utilizando la ecuación 13.6	230
A.1. Tabla extendida con principales características de los vehículos eléctri-	
cos utilizados en las simulaciones	244

Índice de tablas

B.1.	Comparación de valores estimados y reales de WLTP.	
	Los valores fueron obtenidos de [130]	248

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

2.1.	Descripción del Baker Electric, año 1899.	5
2.2.	Detroit Electric y su publicidad del año 1912	6
2.3.	Modelo EV1 de General Motors.	7
2.4.	Modelo Nissan Leaf y su interior	8
2.5.	Esquema de vehículo híbrido, configuración en serie	9
2.6.	Vehículo basado en celdas de hidrógeno	11
3.1.	Fases de un motor de cuatro tiempos [10]. \ldots \ldots \ldots \ldots	14
3.2.	Funcionamiento básico del motor eléctrico de corriente continua	15
3.3.	Comparación torque y potencia. Vehículo eléctrico vs ICE	16
3.4.	Esquema genérico de un vehículo eléctrico [14]	18
3.5.	Motor DC con escobillas [15] \ldots	20
3.6.	Motor de inducción [16] \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	21
3.7.	Motor de imanes permanentes [17]	22
3.8.	Motor sincrónico de reluctancia [18]	23
3.9.	Entrada y salida de un convertidor genérico de electrónica de po-	
	tencia con sus componentes internos $[26]$	25
3.10.	Esquema genérico del tren de conducción y los convertidores de	
	electrónica de potencia [26]	26
3.11.	. Componentes típicos de electrónica de potencia en un VE $[26]$	27
3.12.	. Flujo de potencia desde el motor hacia la batería y viceversa $[26]$.	27
3.13.	Pines de señal para los conectores tipo 1 y 2 [27]	28
3.14.	Diagrama del circuito equivalente para el pin de proximidad. Ex-	
	traído de la norma IEC 61851-1, año 2017. [28] \ldots	30
3.15.	. Tabla B.1 referenciada en la norma IEC 61851-1. [29]	30
3.16.	. Circuito equivalente de 3.14 al no estar conectado el vehículo al SAVE.	31
3.17.	. Circuito equivalente de 3.14 al presionar el botón en el conector.	31
3.18.	. Circuito equivalente de 3.14 al conectar el cable entre el vehículo y	
	el SAVE	32
3.19.	Esquema Vehículo - Estación de carga en AC [27]	33
3.20.	. Estación de carga en AC - Electrónica de potencia en el VE $[27]$.	33
3.21.	Conector AC tipo 1. Utilizado en EE.UU y Japón [27]	35
3.22.	Conector AC tipo 2. Utilizado en Europa y Uruguay [27]	35
3.23.	Conector AC Tesla $[27]$	36
3.24.	. Tamaños estaciones de carga DC y AC [30]	36

3. 3	25. Operación carga DC [30]
0	cha: Conector CCS - Combo 1 hembra en el vehículo [30]
ર	27 Izquierda: Conector CCS - Combo 2 de la estación de carga Dere-
0	cha: Conector CCS - Combo 2 hembra en el vehículo [30]
3	28 Conector CHAdeMO [30]
ુ. ૨	20. Conector TESLA [30]
່ງ. 2	30 Conector China basada an al astándar CB/T [30]
5	$30. Collector Chillo basado en el estandar GD/1. [30] \ldots \ldots$
4	1. Ánodo, cátodo y electrolito en una batería [32]
4	2. Descarga de una celda [31]
4	3. Carga de una celda [31]
4	4. Composición de batería de litio
4	5. Formas constructivas de baterías de Litio
4	6. Celdas prismática, cilíndrica y tipo "pouch".
4	7. Baterías NCA utilizadas en Tesla
4	8 Comparativa de baterías de litio según su composición [37]
4	9 Energía utilizable v absoluta en las baterías de litio
4	10 Resistencia interna de una batería de litio en función del SOC al
Т	variar la temperatura
4	11 Voltaio de una colda de litio en función de la capacidad a distintos
4	C .
4	12 Número de ciclos en función del DoD para distintos tipos de cuímica
4	[42]
4	[42] · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
4	13. Etapas durante el proceso de carga.
5	1. Renault Kangoo ZE Maxi
5	2. Nissan Leaf
5	3. Renault Zoe
5	4. BYD E6
5	5 Volkswagen e-UP!
0	
6	1. Ciclo de Conducción NEDC
6	2. Ciclo de Conducción WLTP Clase 3
7	1. Fuerzas actuando sobre el vehículo en una pendiente
7	2. Distribución de la presión en el área de contacto
7	3. Fuerzas actuando en la cubierta contra la deformación de la cubierta \hfill
	en carga y descarga.
7	4. Deformación de la cubierta y resistencia de rodaje en (a) superficie
	dura, y (b) superficie blanda.
$\overline{7}$	5. Forma de arrastre del vehículo
$\overline{7}$	6. Coeficiente de arrastre C_D para diferentes formas de vehículos
7	7. Vehículo subiendo una pendiente
7	8. Tren de fuerzas de un automóvil
7	9. Fuerza de tracción y torque en una rueda

7.10. Torque y potencia reales en función de velocidad para la Renault	
Kangoo ZE	95
7.11. Torque en función de velocidad para el caso de la Renault Kangoo	
ZE	96
7.12. Circuito equivalente del modelo de la batería utilizado	98
7.13. Tensión de vacío contra SOC para batería NMC	99
7.14. Tensión de vacío contra SOC para batería LMO	99
7.15. Tensión de vacío contra SOC para batería LFP	100
7.16. Comparación entre SOC utilizable escalado y SOC real utilizable	107
7.17. Vida útil de la batería NMC en tres formas diferentes de uso	109
7.18. SOH en función de ciclos de descarga (n) para 40 $\%$ de DOD y 80 $\%$	
de DOD	110
7.19. SOH en función de ciclos de descarga (n) para mismos DOD y di-	
ferentes SOC.	111
7.20. Dependencia de la vida útil de la batería NMC según el Crate.	112
7.21. Dependencia de la vida útil de la batería NMC según la Temperatura	1.113
8.1. Modelo completo del vehículo eléctrico realizado en Simulink	116
8.2. Bloque Entorno	118
8.3. Interior del bloque Conductor.	119
8.4. Controlador que determina la aceleración y la desaceleración	119
8.5. Bloque Controlador	121
8.6. Bloque "Torque Planta"	122
8.7. Dentro del bloque Gestión de Control	123
8.8. Sub bloque "Cálculo de la consigna de torque a solicitar según la	
potencia disponible"	124
8.9. Sub bloque "(+) Torque a requerir (posible)"	125
8.10. Bloque $V2G/G2V$	125
8.11. Bloque $V2G/G2V_Crnt$	126
8.12. Bloque cálculo de corriente V2G	127
8.13. Etapas de Carga en baterías de litio [69]	127
8.14. Bloque cálculo de corriente G2V	129
8.15. Bloque "Vehículo de Pasajeros"	130
8.16. Bloque Planta eléctrica (motor - batería)	131
8.17. Bloque Motor	132
8.18. Curvas Potencia - Torque en función de la velocidad para la Renault	
Kango ZE	132
8.19. Limitante del torque utilizado en la simulación para la Renault Kan-	
goo ZE	132
8.20. Bloque Batería	134
8.21. Bloque "Gestor de corriente demandada"	134
8.22. Bloque "Batería Mapeada"	136
8.23. Calculo de tensión V_{batt} .	137
8.24. Bloque "Cálculo de energía consumida"	137
8.25. Bloque "Cálculo del SOC"	138
8.26. Bloque de entradas y salidas del bloque tren de conducción	139
× v 1	

8.27. Vista general del bloque del tren de conducción del vehículo	140
8.28. Ejes rotativos del vehículo a simular [70].	140
8.29. Bloques utilizados en Simulink de ejes rotatorios del vehículo	141
8.30. Bloques utilizados en Simulink para obtener la velocidad lineal y las	
revoluciones del motor	141
8 31 Modelado del bloque "Wheels and Brakes"	142
8.32 Modelado del bloque "Vehicle"	142
8.33 Velocidad angular del motor en función de la velocidad lineal del	112
vehículo	1/13
8 34 Bloque Visualización	144
	111
9.1. Interfaz de bienvenida	146
9.2. Interfaz principal	147
9.3. Seleccionar ciclo de conducción	148
9.4. Ciclo de conducción seleccionado	148
9.5. Seleccionar vehículo eléctrico	149
9.6. Vehículo eléctrico seleccionado correctamente	149
9.7. Encender aire acondicionado en el VE	150
9.8. Seleccionar si se desea unir los ciclos de conducción	150
9.9. Comenzar la simulación con ciclos de conducción	151
9.10. Botones de Continuar, Pausa, Stop y Reset del programa	152
9.11. Observar distancia recorrida, SOC actual remanente, y seleccionar	
gráfico para ver la simulación en tiempo real	152
9.12. Gráfico del estado de carga (SOC) en tiempo real de la simulación	153
9.13. Botón para calcular el estado de salud de la batería. Valores del	
estado de carga y distancia recorrida actualizados luego de finalizar	
la simulación.	154
9.14. Interfaz gráfica para el SOH de la batería.	154
9.15. Cantidad de ciclos insertados manualmente en la interfaz para el	
cálculo del SOH.	155
9.16. Valor del SOH con 1200 ciclos ingresados para un determinado ciclo	
de conducción.	155
9.17. Botón para cargar los parámetros para realizar una descarga desde	
el VE hacia la red.	156
9.18. Botón para simular una descarga desde el vehículo hacia la red, o	
una carga desde la red hacia el vehículo.	157
9.19. Botón para cargar los parámetros a utilizar en la carga del VE desde	
la red	157
9.20. Botón para cambiar parámetros de la simulación.	158
9.21. Interfaz gráfica para cambiar parámetros de la simulación.	159
9.22. Interfaz gráfica con los valores actuales cargados de la simulación.	159
9.23. Modificar valores actuales para la simulación	160
9.24. Cerrar v guardar valores modificados.	160
9.25. Botón para abrir interfaz gráfica para comparar VEs.	161
9.26. Interfaz gráfica principal para comparar VEs.	161
9.27. Seleccionar ciclo de conducción para comparar vehículos eléctricos	162
see set set as a set a s	

9.28. Seleccionar el primer vehículo	162
9.29. Seleccionar el segundo vehículo.	163
9.30. Seleccionar parámetro a comparar entre los vehículos	163
9.31. Botón para comparar parámetros y gráficos correspondientes	164
9.32. Interfaz donde se muestra los parámetros de cada VE y el ciclo de	
conducción seleccionado	164
10.1. UTE - Cerro	168
10.2. Cerro - Fac. Ingeniería	169
10.3. F. de Ingeniería - Mvdeo. Shopping	169
10.4. Mvdeo. Shopping - Ciudad Vieja	170
10.5. Ciudad Vieja - Jujuy	170
10.6. Pendientes obtenidas para el recorrido UTE-Cerro a través de Goo-	
gle Earth	174
10.7. Simulación de velocidades para el ciclo completo Montevideo	176
10.8. Simulación de torque para el ciclo completo Montevideo	177
10.9. Simulación de SOC para el ciclo completo Montevideo	177
10.10 Simulación de corriente para el ciclo completo Montevide o \ldots .	178
10.11 Simulación de tensión para el ciclo completo Montevide o \ldots . \ldots	178
10.12Simulación de potencia para el ciclo completo Montevideo	179
10.13Simulación de energía para el ciclo completo Montevideo	180
10.14Zoom para observar parte de la energía generada en el ciclo Monte-	
video completo	180
12.1. Potencia entregada por la bateria - Renault Kangoo - Ciclo NEDC con v sin pendiente	191
12.2 Torque en el motor con Ciclo NEDC con y sin pendiente - Renault	101
Kangoo	191
12.3. Comparación de potencia motor vs batería - Renault Kangoo	192
12.4. Torque en el motor con Ciclo NEDC con y sin pendiente - Renault	
Kangoo	192
12.5. Estado de carga en función del tiempo, considerando el ciclo Mon-	
tevideo.	
Se muestra el comportamiento para todos los vehículos estudiados.	
El vehículo indicado con "Kangoo" se refiere a la Renault Kangoo	
de 22 kWh	195
12.6. Energía consumida en función del tiempo, considerando el ciclo	
Montevideo.	
Se muestra el comportamiento para todos los vehículos estudiados.	
El vehículo indicado con "Kangoo" se refiere a la Renault Kangoo	
de 22 kWh	195
12.7. Ciclo Estándar implementado	200
12.8. Estado de salud en función del <i>Crate</i>	203

12.10Efecto SEI (Solid electrolyte interphase). [88]	
Se observa como el cátodo pierde iones de Mn y van hacia la frontera	
del ánodo por el electrolito. En la frontera del ánodo y el electrolito	
se va formando el SEI, que luego corroe al grafito.	209
13.1. Meses de repago para el Renault Zoe y Kangoo 33 con y sin V2G.	225
13.2. Ahorro para el Renault Kango o con un recorrido diario de 39.3 km $$	
en función de los meses de uso.	226
13.3. Ahorro para el Renault Zoe con un recorrido diario de 39.3 km en	
función de los meses de uso	226

Esta es la última página. Compilado el miércoles 14 agosto, 2019. http://iie.fing.edu.uy/

Baterías en Vehículos Eléctricos Conectados a la Red BeV2G

Agustín Mosto Silvestri, Jonathan Acosta Canavese, Alejandro Gigena Fernández. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.

Abstract-En la actualidad, el estudio y el desarrollo de nuevas tecnologías relacionadas con los vehículos eléctricos son fundamentales para disminuir la dependencia del petróleo en el transporte. El presente proyecto tiene como principal objetivo el estudio de baterías en vehículos 100% eléctricos. Se estudia la forma en que los distintos usos del vehículo afectan a la batería y en particular se analiza la conveniencia del uso de sistemas V2G (Vehicle To Grid – Vehículo a la Red). Se implementa un software (utilizando Matlab - Simulink) que posibilita realizar simulaciones en distintos modelos de VE. Permite recorrer diferentes ciclos de conducción, realizar descargas hacia la red (V2G) y cargas de la batería. Luego de realizadas las simulaciones permite evaluar el estado de salud con un número de ciclos determinado y obtener la vida útil en número de ciclos de la batería. A partir del software desarrollado, se realizan estudios y análisis de distintos tipos de uso de las baterías, evaluando el impacto en las mismas y buscando un uso óptimo para conseguir una mayor vida útil.

Index Terms—Baterías, V2G, descarga a la red, SOH, estado de salud, litio, modelado, vehículos eléctricos.

I. INTRODUCCIÓN

E N la actualidad, gran parte de las emisiones contaminantes y los gases de efecto invernadero en el planeta provienen del sector transporte, debido a los motores de combustión interna utilizados [1]. Las reservas mundiales de petróleo se están agotando, por lo que es necesario desarrollar energías alternativas para un mercado que cada vez crece más. La preocupación mundial por el calentamiento global es tal que, en el 2016 se firma el Acuerdo de París, que establece medidas para la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [2].

En el escenario planteado es necesario investigar e incorporar al uso cotidiano más en tecnologías "limpias", de consumo responsable. Es aquí donde el estudio de vehículos 100%

El presente trabajo fue realizado en el marco de proyecto de fin de carrera para la obtención de título de grado en Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, UdelaR.

Realizado bajo la tutoría del Ing. Juan Pedro Carriquiry, Ing. Federico Arismendi y Dr. Ing. Mario Vignolo, pertenecientes al Grupo de Trabajo de Vehículos Eléctricos de la Facultad de Ingeniería, UdelaR.

Agustín Mosto Silvestri, estudiante de Ingeniería Eléctrica, perfil Sistemas Eléctricos de Potencia, Facultad de Ingeniería, UdelaR. Contacto: amosto90@gmail.com

Jonathan Acosta Canavese, estudiante de Ingeniería Eléctrica, perfil Sistemas Eléctricos de Potencia, Facultad de Ingeniería, UdelaR. Contacto: jonagnr82@gmail.com

Alejandro Gigena Fernández, estudiante de Ingeniería Eléctrica, perfil Sistemas Eléctricos de Potencia, Facultad de Ingeniería, UdelaR. Contacto: alejandrogigena33@gmail.com eléctricos es fundamental. Actualmente, las ventajas operativas que tiene el vehículo a combustión interna frente al vehículo eléctrico son su mayor autonomía y su menor costo. Ambas características, costo y autonomía, vinculadas fuertemente a las baterías de los vehículos, por lo que los estudios sobre las mismas cobran gran relevancia.

Para realizar dicho estudio se generó una herramienta utilizando Matlab-Simulink que es capaz modelar y simular el andamiento de diferentes vehículos eléctricos en distintas situaciones de uso. Se presta especial atención al comportamiento de las baterías y en particular a la gestión de la descarga y su impacto en el estado de salud (SOH) de las mismas luego de su uso.

II. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Crate - Tasa de descarga/carga

DOD - Depth of discharge. Profundidad de descarga.

NMC - Batería de Óxido de Litio Níquel Manganeso Cobalto

SOH - Estado de salud de la batería.

SOC - Estado de carga de a batería.

V2G - Vehicle to grid, descarga de un vehículo eléctrico hacia la red.

VE - Vehículo eléctrico

III. BATERÍAS, VEHÍCULOS Y CICLOS DE CONDUCCIÓN A ESTUDIAR

Se realizará una breve reseña en cuanto a las baterías, vehículos y ciclos de conducción que serán estudiados en el presente proyecto.

A. Baterías

Existen distintos tipos de baterías que se han utilizado a lo largo de los años para aplicación en vehículos eléctricos. En la actualidad las baterías de litio resultan ser un sistema de almacenamiento muy conveniente por su bajo peso, elevado voltaje por celda, buena conductividad eléctrica y alta eficiencia electroquímica, en comparación con las baterías de NiMH, NiCd y Plomo-ácido.

Las baterías de iones de litio pueden tener muchas variaciones en su composición química, pero todas tienen una cosa en común: el ion de litio en el electrolito. Aunque parecen similares a primera vista, estas baterías varían en rendimiento y características dependiendo de la elección de los materiales activos (generalmente del cátodo, ya que el ánodo es usualmente de grafito), lo cual les da atributos únicos. Entre las más utilizadas se encuentran las de: Óxido de Litio Cobalto (LCO), Óxido de Litio Manganeso (LMO), Litio Hierro Fosfato (LFP), Óxido de Litio Níquel Cobalto Aluminio (NCA), Óxido de Litio Níquel Manganeso Cobalto (NMC) y Litio Titanato (LTO).

En particular las de Óxido de Litio Níquel Manganeso Cobalto (NMC) son las más utilizadas para distintas aplicaciones recientes de VE. La clave de la combinación de NMC es la siguiente: el níquel otorga alta energía específica pero pobre estabilidad; el manganeso tiene la ventaja de formar una estructura de espinela para lograr una baja resistencia interna, pero a cambio ofrece una energía específica baja. Los metales complementan sus virtudes. La combinación ofrece una mezcla que reduce el costo de la materia prima debido al contenido reducido de cobalto.

B. Vehículos utilizados

Los vehículos eléctricos que serán implementados en el presente proyecto fueron seleccionados por ser conocidos mundialmente, con posibilidades reales de arribar al mercado Uruguayo (en caso que no hayan arribado aún).

En la siguiente tabla I se muestran los vehículos implementados y sus principales características eléctricas y mecánicas.

Vehículo	Renault Kangoo	Nissan Leaf	Renault Zoe	BYD E6	Volkswagen e-UP!	Renault Kangoo 33
Potencia (kW)	44	80	80	90	61	44
Torque (Nm)	226	254	225	450	210	225
Voltaje batería (V)	360	360	345.6	307	374	345.6
Energía batería(kWh)	22	24	41	61	18.7	33
Química batería	LMO	LMO	NMC	LFP	NMC	NMC
Peso en vacío (kg)	1553	1474	1575	2380	1139	1553
		TA	BLE I			

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS VEHÍCULOS IMPLEMENTADOS.

C. Ciclos de conducción

Se le llama ciclo de conducción a una cantidad de datos ordenados de velocidad en función del tiempo que describen cierto recorrido. Existen multiplicidad de ciclos, que buscan representar recorridos urbanos, rurales, de autopista, largos, cortos, con y sin tráfico, o que incluso agrupen muchos de estos comportamientos. Los ciclos de conducción surgieron con el fin de medir las emisiones y consumo de vehículos a combustión interna. Para VEs se utilizan como forma de medir su autonomía en km.

Para el presente estudio se utilizaron los siguientes:

Ciclo NEDC - El New European Driving Cycle (NEDC) es un ciclo de conducción estandarizado europeo surgido en los años 80. Consta de dos etapas diferenciadas, una urbana de duración 800 segundos y velocidad máxima alcanzada de 50 km/h, y una segunda etapa representa recorrido en carretera que llega a velocidad máxima de 120 km/h, el total del ciclo es de 1180 segundos. El ciclo NEDC ha ido quedando obsoleto en el tiempo ya que no es una fiel representación de la realidad; hay muchas velocidades mantenidas en el tiempo, la aceleración es paulatina y no hay frenadas bruscas ni cambios de aceleración.

Ciclo WLTP - El ciclo WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) fue desarrollado con el objetivo de ser utilizado como un Ciclo de Conducción global. Fue creado en en el año 2017 y es obligatorio a partir del 1 de setiembre de 2018. Se definen cuatro etapas con diferentes velocidades promedio: "baja", "media", "alta" y "extra alta". Las etapas incluyen variedad de fases de conducción, con aceleraciones, frenados y lapsos de vehículo detenido. Se definen también tres sub-ciclos o clases que se aplican para probar los vehículos dependiendo de la potencia del motor y su masa en vacío. Todos los vehículos estudiados en el presente proyecto están dentro de lo que se denomina WLTP Clase 3.

Ciclo Montevideo - Se buscó determinar un ciclo de conducción para la ciudad de Montevideo, Uruguay, a partir de una prueba en un VE real (se detalla en VII). El ciclo obtenido (Ciclo Montevideo) fue diseñado para cumplir y abarcar varios sectores de la ciudad que son recorridos habitualmente por miles de usuarios. El ciclo Montevideo consume más de 5500 segundos y recorre una distancia de 42.3 km. Algunos detalles más de este ciclo creado se darán en la sección VII.

Ciclo Estándar - A partir de los datos relevados para el Ciclo Montevideo, se decide crear el Ciclo Estándar con el fin de representar el recorrido diario que realiza una persona en la ciudad de Montevideo. Este ciclo es un ciclo netamente urbano, con velocidades medias y sin tramos de carretera. El ciclo implementado tiene una duración de 6089 s y recorre 39.3 km.

IV. MODELADO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

Utilizando Matlab-Simulink se realizó un modelado del vehículo eléctrico, el cual se organiza en siete bloques que interactúan entre sí. A continuación se realiza una breve descripción de los mismos.



Fig. 1. Modelado - Esquema General

Gestor - Ciclo de Conducción: Contiene el ciclo de conducción que se desea simular. Permite ingresar el mismo desde el workspace de Matlab.

Entorno: Importa desde el workspace los datos del entorno en donde se moverá el vehículo, tales como la temperatura ambiente (K), la presión atmosférica (Pa), el vector con los ángulos de inclinación del terreno (grados) y la velocidad del viento(m/s).

Conductor: Simula los pedales del conductor para acelerar o desacelerar. Utiliza la velocidad de referencia (en base al ciclo de conducción), y la velocidad lineal a la que se está desplazando el vehículo (velocidad de realimentación) para obtener los valores de aceleración o desaceleración necesarios. El sistema utiliza un bloque proporcional - integral (PI) junto con otras constantes para realizar el control frente a distintas situaciones de uso.

Controlador: Calcula el torque que se debería solicitar al motor de forma de poder cumplir con la consigna de velocidad dada por el ciclo de conducción. Dependerá también del vehículo que se esté utilizando, la velocidad actual, la velocidad del motor, las condiciones impuestas por el ambiente, entre otras.

Este bloque también implementa un módulo de control del tren motriz, con un sistema de alimentación basado en la batería del vehículo eléctrico. Este control determina el torque final en el motor en función de la solicitud de torque y las distintas limitaciones del sistema (por ejemplo la potencia máxima del motor, torque máximo, entre otras).

V2G/G2V:El bloque realiza el cálculo de la corriente que se intercambia entre el VE y la red, la cual podrá ser una corriente de carga o de descarga. Durante la carga (G2V) se implementan cuatro etapas de carga considerando el estado de carga (SOC) y la tensión de la batería. Por otra parte la descarga (V2G) se realiza a una consigna de potencia constante, se limita la potencia máxima a entregar así como también el estado de carga (SOC) al que se permite extraer energía de la batería para evitar trabajar con descargas demasiado profundas.

Vehículo de pasajeros: Modela el motor y la batería utilizados en el vehículo eléctrico. Contiene también el bloque que modela el tren de conducción del vehículo, incluyendo engranajes, diferencial, ejes rotacionales, freno, entre otros.

Para el modelo del motor se implementó un motor mapeado, en donde a partir de un mapa de eficiencia se obtiene la potencia mecánica y la potencia de pérdidas en el motor. Con estos datos se calcula la corriente necesaria que debe entregar la batería al motor para cumplir con las exigencias de torque determinado por el ciclo de conducción.

La batería se modela con un equivalente Thevenin, como una fuente ideal (tensión de vacío) y una resistencia (resistencia interna) en serie. Las características de la resistencia interna y de la tensión de vacío de la batería dependerán de la temperatura ambiente, el SOC y el tipo de química de la batería utilizada. También afectarán el número de celdas que se coloquen en serie y en paralelo.

Visualización: Se escogen y se muestran de forma gráfica las magnitudes de mayor interés.

V. MODELADO DEL ESTADO DE SALUD (SOH)

A. Algoritmo utilizado

El algoritmo a implementar está basado en un artículo realizado en la Universidad de Chalmers, Gotemburgo, Suecia [3]. En dicha publicación se propone una función que ajusta la capacidad remanente en la batería luego de realizar cierto número de ciclos de descarga para las baterías de química NMC. Para la determinación del algoritmo fueron realizados múltiples ensayos sobre las baterías, que fueron testeadas durante 3 años. Cada batería fue descargada en umbrales del 10% del SOC, a C-rates fijos de 1C, 2C y 4C y luego cargada hasta el mismo valor del SOC inicial a un ritmo de C/8, siendo C la capacidad nominal. El modelo utiliza como variables de entrada: el SOC inicial, SOC final, Crate, la temperatura de la batería, la profundidad de descarga DOD y la cantidad de ciclos completos equivalentes (FCE, full cycle equivalent), los cuales equivalen a una descarga y una posterior carga completa (del 100% al 0% y del 0% al 100%).

La función que ajusta la capacidad máxima remanente en la batería se muestra en la siguiente ecuación:

$$Cap(SOC, DOD, Crate, T, FCE) = a \cdot e^{b \cdot FCE} + c \cdot e^{d \cdot FCE}$$
(1)

Se realizaron diversos ensayos a distintos Crates y temperaturas con el fin de ajustar los parámetros a, b, c y d de forma de representar con el modelo los resultados experimentales.

Se destaca que *a* depende del SOC, *b* depende del SOC y del Crate, *c* depende del paramétro *a* y por último *d* depende de la temperatura, el Crate y el intervalo del SOC en el que se encuentre la descarga. Las expresiones completas de estos parámetros podrán encontrarse en el artículo citado en [3].

Para poder hallar el SOH, también se utiliza el concepto de "capacidad perdida", la cual es simplemente la resta entre la capacidad máxima inicial menos la remanente determinada por la ecuación 1.

Luego de esto se puede calcular el estado de salud de la batería como:

$$SOH = SOH_{inicial} - \frac{Capacidad_{perdida}}{Capacidad_{nominal}}$$
(2)

Para determinar la cantidad de ciclos n de vida útil, se puede hallar el FCE de la ecuación 1 tal que el SOH sea un 80%. Obtenido el valor de FCE, se calcula la cantidad de ciclos reales n de la siguiente forma:

$$n = \frac{FCE \cdot 100}{DOD} \tag{3}$$

B. Implementación del algoritmo

De manera de poder implementar el algoritmo anteriormente descrito en el presente trabajo, fue necesario realizar ciertas modificaciones y/o consideraciones, las cuales se indican a continuación.

Temperatura - Debido a que no se contaba con todos los datos necesarios del parámetro d a distintas temperaturas, se considera solamente la temperatura de 35°C.

Capacidad utilizable - Generalmente los VEs no utilizan el 100% de la energía en sus baterías (capacidad máxima real),

sino que por diferentes motivos sólamente pueden utilizar cierta energía (capacidad máxima utilizable). Dado que el algoritmo utilizado trabaja con datos de energía real y que los datos de energía en VEs dados por fabricantes corresponden a la energía utilizable, es que se debe modificar estos valores cuando utilicemos el algoritmo. Esta modificación se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$Capacidad_max_real = \frac{Capacidad_max_utilizable}{0.8}$$
(4)

el valor de 0.8 corresponde a que se decidió utilizar una energía utilizable que se encuentra entre el 10% y el 90% de la energía real de la batería.

Porcentaje (%) de SOC utilizable vs real - El algoritmo del SOH utiliza los datos de capacidad real y de energía real de la batería, por lo tanto utiliza un % de SOC real. Los datos de SOC que se obtienen del VE durante los recorridos corresponden a % del SOC utilizable, por lo tanto será necesario escalarlo del 0% al 100% real para poder trabajar correctamente con el algoritmo.

C-rate - En el artículo estudiado, los ensayos fueron realizados para un Crate fijo, por lo que no era necesario distinguir entre tramos. En la realidad, al simular un VE se tendrán tramos de corrientes muy diversas (debido a las exigencias del recorrido), por lo tanto para el Crate se toma el promedio del módulo de la corriente entregada por la batería para cada intervalo de 10% del SOC, dividida por la capacidad nominal de la misma.

Otra consideración relevante es que en el artículo referenciado se utilizó una batería NMC con una capacidad nominal de 26Ah. Para utilizar el modelo con otras baterías NMC de diferente capacidad, se deberá normalizar el ritmo de descarga dividiendo la corriente que efectivamente entrega la batería por la capacidad nominal de la misma, para así trabajar con el Crate.

VI. INTERFAZ GRÁFICA

Se generó una interfaz gráfica utilizando la GUI (Graphical User Interfaces) de Matlab-Simulink con el fin de crear una herramienta para realizar simulaciones y acceder a datos obtenidos en el modelo de forma práctica y sencilla.

A través de la misma es posible simular todas las posibilidades que brinda el modelado.



Fig. 2. Interfaz gráfica - Vista principal

La interfaz permite simular el comportamiento en distintos VEs al realizar variados ciclos de conducción. Tanto los vehículos como los ciclos de conducción a simular son seleccionables desde una lista desplegable.

Además el programa permite interactuar con la red tanto para cargar el vehículo como para descargar el vehículo hacia la red (V2G) u hogar.

Luego de simulados todos los ciclos que se desean evaluar sobre un determinado VE, la interfaz permite hallar el SOH de sus baterías (aplicando el algoritmo anteriormente detallado), si se realiza ese determinado ciclo n veces. También la interfaz permite hallar cuantos ciclos (n) podremos realizar con esas determinadas características hasta que el SOH de las baterías llegue a un 80%.

El programa permite la modificación de varios parámetros con el fin de generar versatilidad en las simulaciones. Se permite modificar características (eléctricas y mecánicas) del VE a simular, características del ambiente (por ej. temperatura) y características de la carga/descarga a la red (por ej. potencia de descarga).

VII. PRUEBA EN VE REAL

De forma de poder validar el modelado se realizó una prueba en un VE real, propiedad de UTE (empresa dedicada a la generación, transporte y distribución de energía eléctrica en Uruguay). Además se aprovechó la instancia para relevar un nuevo ciclo de conducción real (Ciclo Montevideo), así como también las pendientes del terreno en dicho recorrido. El vehículo utilizado fue una Renault Kangoo ZE Maxi.

Para las pruebas, se realizaron 5 recorridos que cubren diversos caminos habituales en la ciudad de Montevideo, Uruguay. Los recorridos incluyen pendientes pronunciadas, recorridos urbanos y recorridos de carretera o rambla, en donde se alcanzan las mayores velocidades. Con estos recorridos se genera el ciclo de conducción llamado Ciclo Montevideo.

Durante los recorridos con el VE real se registraron las exigencias máximas del motor y baterías, y luego de finalizados los recorridos se utilizaron los datos de energía consumida y estado de carga final para ajustar el modelado realizado en Matlab-Simulink.


Fig. 3. Simulación de energía consumida en función del tiempo para el VE utilizado en la prueba real

Luego de haber realizado el ajuste correspondiente, el valor final de la energía consumida en la simulación es de 8.24 kWh. En el recorrido real se registró un consumo de 8.34 kWh, lo que implica un -1.2% de error entre el modelo y la realidad, lo cual se considera aceptable.

VIII. ESTUDIOS REALIZADOS

Luego de haber introducido todas las herramientas, en la presente sección se estudiarán diversos aspectos de uso del VE y la forma en que repercuten en la vida útil de las baterías.

A. Influencia de la pendiente

Se estudia la forma en que afecta a la autonomía el hecho de considerar las pendientes en los ciclos internacionales (NEDC y WLTP) y en el ciclo Montevideo.

Se puede observar que para el ciclo NEDC, el agregar la pendiente pequeña, genera que la autonomía disminuya con respecto al caso sin pendiente en un $16.9\% \pm 3\%$, mientras que para el ciclo WLTP la misma varía entre un $14.5\% \pm 1.1\%$. En estos dos casos se tomó una pendiente constante con el valor promedio de uno de los cinco tramos del Ciclo Montevideo. Para el Ciclo Montevideo el efecto es mayor, situándose entre un margen de $24\% \pm 1.3\%$. El ciclo Montevideo es el que mejor refleja la influencia de la pendiente, ya que fue relevado en forma real durante los recorridos, con la pendiente correspondiente y ajustado para lo realizado y verificado con la autonomía definida por el fabricante con el ciclo NEDC (en la Renault Kangoo).

B. Análisis Ciclo Estándar

Para este primer análisis, se simula el hecho de realizar una vez el recorrido del Ciclo Estándar para cada vehículo (que cuentan con baterías de NMC), comenzando con su batería cargada al 100%. Luego de realizadas las simulaciones, se calcula el n° ciclos que se pueden realizar hasta que la capacidad de la batería se reduzca a un 80% de su valor inicial.

Evaluando el n° de ciclos, se tiene que el Renault Zoe es capaz de soportar un uso durante 5.55 veces más que el VW E-Up! y 1.62 veces más que la Kangoo de 33 kWh. A su vez la vida útil de la Kangoo es 3.24 veces más que el e-Up!.

Lo descripto en el párrafo anterior se explica mediante el algoritmo del SOH. La profundidad de descarga (DOD) que se le realiza a la batería juega un rol preponderante, ya que el SOH disminuye rápidamente con el aumento del DOD. Como el Renault Zoe es el que tiene mayor capacidad de almacenamiento de energía, es el que impone un menor DOD para completar el ciclo Estándar. Además el Renault Zoe es el que tiene mayor rendimiento en kWh por cada km utilizado para este ciclo, lo cual también aporta a que el DOD sea menor.

El resultado anterior, puede aplicarse también para evaluar cuándo es más conveniente realizar la carga del VE, es decir cargar cada un día, dos días, tres días, etc.

Para evaluar esto tomamos el caso de cargar el VE cada dos días, lo cual significa realizar simulaciones de dos ciclos estándar (un ciclo estándar por día) y luego una posterior carga al 100%. Lo que verá el VE en sus baterías será una descarga el doble de profunda (ya que estamos aplicando dos ciclos Estándar), por lo que la vida útil disminuirá en forma notable. En el caso del Renault Zoe la diferencia de cargar el vehículo cada dos días o cada uno se traduce en un 43% más de vida útil cuando se carga cada día. Para el VW E-Up!, se mantiene la tendencia anterior, en este caso la vida útil en km aumenta un 25% más. Por último en la Renault Kangoo 33kWh se obtienen los rendimientos más amplios, en donde la vida útil aumenta un 76% más al cargar el vehículo cada día.

En base a lo anterior y realizando un pensamiento análogo, se puede ver que se obtendrá un mejor rendimiento del vehículo (en cuanto a la vida útil de las baterías) si se carga el vehículo cada vez que se pueda, de manera que en el recorrido realizado, siempre estemos trabajando con bajas profundidades de descarga.

C. Ciclo Estándar + V2G

Se estudia la influencia de descargar energía a la red (V2G) o al hogar. Se realizará un recorrido Estándar y posteriormente se entregará la energía remanente en la batería a la red (hasta llegar a un SOC del 10%).

Realizando las simulaciones, y hallando el n° de ciclos se tiene que independientemente del vehículo estudiado, los resultados en cuanto a la vida útil en años son similares (aproximadamente 5 años). Esto ocurre ya que el DOD en todos los casos es el mismo (DOD=90%), lo que varía son los Crates, los cuales se encuentran siempre en valores entre 0.15C y 0.3C para los VE estudiados.

Es notorio que su vida útil se reduce considerablemente frente al caso de no descargar a la red. Si lo comparamos con el caso en que solamente se realiza un ciclo Estándar y luego carga la batería, el hecho de descargar a la red impactará en la vida útil, siendo para el caso del Zoe aproximadamente 13 veces mayor el kilometraje que podremos recorrer si no descargamos a la red. En el caso de la Kangoo 33kWh podremos recorrer 8 veces más y con el VE E-Up! tendremos un rendimiento aproximadamente 2 veces superior.

D. Optimización de uso de batería

Se estudia cómo varía el SOH simulando el ciclo Estándar, para cada uno de los vehículos con batería NMC, utilizando las mismas profundidades de descarga (DOD) pero con diferentes condiciones iniciales del estado de carga (SOC).

Vehículo	SOC inicial (%)	SOC final (%)	n° ciclos	Rendimiento
Renault Zoe	100	84.78	24 519	1.0
	50	34.83	74 215	3.0
	30	14.79	156 628	6.4
VW E-Up!	100	51.00	4 421	1.0
	50	2.94	18 863	4.3
Renault Kangoo 33	100	75.01	15 111	1.0
	50	25.26	45 840	3.0
	30	5.67	76 867	5.1
TABLE II				

Cantidad de ciclos y rendimiento de la vida útil de la batería para cada vehículo según el SOC inicial con el que se comience para iguales DOD en el ciclo Estándar.

La tabla II muestra la cantidad de ciclos que es capaz de realizar cada vehículo para el mismo recorrido hasta que la capacidad de la batería llegue al 80% de su capacidad máxima. Se comienzan las simulaciones con estados de carga distintos (100%, 50% o 30%) y se simula el mismo ciclo Estándar en todos los casos.

Se aprecia que la cantidad de ciclos aumenta cuando utilizamos valores bajos de estado de carga inicial, a tal punto que para el caso del Renault Zoe, se puede extender la vida útil de la batería 6.4 veces si se comienza con un estado de carga del 30% en vez de comenzar con 100% para el ciclo de conducción Estándar.

El fundamento de este comportamiento se explica desde el punto de vista químico de la batería. Lo que ocurre es en % de SOC elevados, se ve aumentada la pérdida de capacidad en el cátodo y también la resistencia interna del ánodo, más rápidamente que si la batería se utilizase en % de SOC bajos.

Por lo tanto, es de buena práctica cargar el auto lo suficiente como para realizar el ciclo de conducción deseado (utilizar bajo DOD) y a su vez utilizarlo con baja energía remanente (bajos SOC), para así extender la vida útil de la batería.

IX. CONCLUSIONES

Se diferencian las conclusiones del proyecto según la temática tratada.

Modelado e Interfaz - Se elaboró una herramienta útil que modela el funcionamiento de un VE y una interfaz gráfica que facilita su uso. La herramienta permite entre otras funcionalidades: simular diferentes ciclos de conducción, cargar/descargar el VE a la red y evaluar el SOH de la batería luego de su uso.

Prueba real en VE y ciclos de conducción - Se validó el software implementado mediante una prueba en un VE real.

Se obtuvieron resultados satisfactorios con un error menor al 1.4% para la energía consumida y el SOC final.

Se elaboró un ciclo de conducción urbano de la ciudad de Montevideo que incluye pendientes. El mismo fue de gran utilidad y podrá ser utilizado para trabajos futuros.

Es importante considerar las pendientes al relevar un ciclo real. Para el Ciclo Montevideo, se acorta la autonomía al menos en un 22.7% para los vehículos estudiados.

Análisis de vida útil de las baterías - Para un mismo recorrido, la vida útil de la batería disminuye más rápidamente cuando la capacidad de almacenamiento de la batería es menor.

Al realizar V2G, la vida útil de la batería se reduce considerablemente.

En VEs el DOD tiene mayor peso en la afectación del SOH de la batería que el C-rate.

Para realizar un uso óptimo en cuanto a la vida útil de una batería NMC se debería evitar DOD grandes y utilizarla en SOC bajos.

Lo ideal es cargar la batería todos los días con la energía suficiente para cubrir el trayecto diario a realizar, para así poder utilizarla en % de SoC bajos y evitar DOD elevados.

REFERENCES

- IEA International Energy Agency. Estadísticas emisiones CO2., https://www.iea.org/statistics/co2emissions/
- [2] Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Acuerdo de París. https://www.mvotma.gub.uy/internacional/item/10010212-acuerdode-paris.
- [3] Torbjorn Thiringer Evelina Wikner. Extending battery lifetime by avoiding high soc, 2018.

Baterías en Vehículos Eléctricos Conectados a la Red – BeV2G Agustín Mosto Silvestri Jonathan Acosta Canavese Alejandro Gigena Fernández Instituto de Ingeniería Eléctrica

Características generales

El principal objetivo es el estudio de baterías en vehículos 100% eléctricos.

Se desarrolla un software (SW) que permite simular el andamiento del vehículo en distintos tipos de recorridos, cargas de la batería desde la red y descargas hacia la red (V2G).

A partir de los resultados obtenidos se realizan diversos estudios y se evalúa la conveniencia de los distintos usos desde el punto de vista de la batería.



IUBStla

2017 Ingeniero Eladio Dieste

Modelado



Figura: Diagrama de bloques principal en Simulink

Análisis realizado

Figura: Pantalla principal de la interfaz gráfica del SW implementado

Se realiza un modelado en Matlab-Simulink para simular las distintas situaciones de uso del VE (vehículo eléctrico) y la forma en que afectan a las baterías.

Se implementa además un modelado para estimar la vida útil y el **estado de salud** (**SOH**) de las baterías.

En base al SW implementado se destacan los siguientes estudios:

- Comparación de ciclos reales vs ciclos internacionales, estimación del peso de la pendiente.
- Evaluación de VEs al realizar un ciclo Estándar (real) con estimación del SOH.
- Optimización del uso de un VE.
- Rentabilidad económica.

Conclusiones



Figura: Estado de carga (State of Charge - SOC) de la batería en función del tiempo para determinado ciclo de conducción.

 Ciclos internacionales vs ciclos reales: El ciclo Montevideo (representa un ciclo real) es al menos un 15% más exigente en autonomía que los ciclos WLTP y NEDC.

✓ Consideración del peso del perfil de pendientes: El perfil de pendientes tiene un peso relevante. Para el ciclo Montevideo (ciclo real), al considerar las pendientes del trayecto se disminuye la autonomía en un 24%±1.3 % para los VE trabajados.

✓ Optimización del uso de un VE: Se recomienda, para prolongar la vida útil de las baterías de NMC, trabajar con DOD pequeños y evitar SOC elevados.

✓ Rentabilidad Económica: Las inversiones se recuperan más rápidamente a medida que se realiza más kilometraje diario. El ahorro por V2G ayuda a recuperar la inversión más rápidamente pero aumenta el deterioro en la batería, cuya vida útil se reduce a aproximadamente 5 años (utilizando del 100% al 10% de la energía útil).

Apoyo

El presente trabajo fue realizado bajo tutoría del Grupo de Trabajo Vehículos Eléctricos (*GTVE*), de la Facultad de Ingeniería, UdelaR.



