



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**ANÁLISIS DE OPERACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN
TRACCIÓN, FRENADO REOSTÁTICO Y REGENERATIVO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: BRYAM FERNANDO GONZALEZ CEDILLO
NIXON JAVIER PELAEZ ALVAREZ**

TUTOR: Dr. JOSE MANUEL ALLER CASTRO

Cuenca - Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Bryam Fernando Gonzalez Cedillo con documento de identificación N° 0105843692 y Nixon Javier Pelaez Alvarez con documento de identificación N° 0105401715 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 12 de Junio del 2023

Atentamente,



Bryam Fernando Gonzalez Cedillo
0105843692



Nixon Javier Pelaez Alvarez
0105401715

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
SALESIANA**

Nosotros, Bryam Fernando Gonzalez Cedillo con documento de identificación N° 0105843692 y Nixon Javier Pelaez Alvarez con documento de identificación N° 0105401715, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “ANÁLISIS DE OPERACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN TRACCIÓN, FRENADO REOSTÁTICO Y REGENERATIVO”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 12 de Junio del 2023

Atentamente,



Bryam Fernando Gonzalez Cedillo
0105843692



Nixon Javier Pelaez Alvarez
0105401715

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Manuel Aller Castro con documento de identificación N° 0151561800, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE OPERACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN TRACCIÓN, FRENADO REOSTÁTICO Y REGENERATIVO, realizado por Bryam Fernando Gonzalez Cedillo con documento de identificación N° 0105843692 y Nixon Javier Pelaez Alvarez con documento de identificación N° 0105401715, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 12 de Junio del 2023

Atentamente,



Ing. José Manuel Aller Castro PhD
0151561800

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer sinceramente a nuestro tutor, el Dr. José Manuel Aller, por su invaluable conocimiento, experiencia y paciencia. Sin su guía constante, este trabajo no habría sido posible. Estamos profundamente agradecidos por su contribución a nuestra formación académica.

Bryam Fernando Gonzalez Cedillo
Nixon Javier Pelaez Alvarez

DEDICATORIA

Primeramente agradezco a Dios por darme tantas bendiciones, las que me han permitido alcanzar mis metas en la vida, te dedico este logro y todos los éxitos de mi vida.

A mi mamá, Paty, quien es mi héroe. Tu amor incondicional y apoyo inquebrantable han sido el pilar fundamental en todas las áreas de mi vida, tanto en mi pasión por el fútbol como en la culminación de mi carrera universitaria. Nunca dejaste de creer en mí. En cada desafío y triunfo, has sido mi apoyo incondicional, mi guía y mi inspiración. Sin ti, nada de esto sería posible.

Anita, aunque ya no estés físicamente, fuiste un pilar fundamental en mi vida y tus enseñanzas perduran en mi corazón. Siempre te recuerdo con cariño y gratitud.

Marle, tu amor maternal me ha cobijado y cuidado en cada momento. Siempre estaré agradecido por tu apoyo y por estar presente en cada etapa de mi vida.

Javi, tu guía y consejo siempre han sido mi brújula. Gracias por estar siempre presente, por encaminarme por el sendero correcto y por creer en mis capacidades para alcanzar mis metas.

Y a ti, Lili, mi fiel compañera de cuatro patas. En las noches oscuras y los días difíciles, has sido mi refugio. Tu amor incondicional y compañía han sido una fuente de consuelo y alegría en todo el trayecto.

“El logro es mío, pero el triunfo es por ustedes”

Bryam Fernando Gonzalez Cedillo

DEDICATORIA

Agradezco primero a Dios, quien me ha dado la fortaleza para seguir adelante y permitirme cumplir este sueño.

La satisfacción que siento por culminar este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo constante y esfuerzo de mis padres, este y todos mis logros es gracias a ustedes, gracias por creer en mí y sobre todo por enseñarme que con responsabilidad y perseverancia todo se puede lograr.

A mi hermana, gracias por existir y por tu apoyo incondicional.

A mi tío, Wilson, mi segundo padre, desde el cielo siempre me acompañas y gracias por enseñarme con tu ejemplo a nunca bajar los brazos.

A todos ustedes muchas gracias, nada de esto hubiera sido posible sin su apoyo.

Nixon Javier Pelaez Alvarez

RESUMEN

En este trabajo se propone el diseño y modelación de un sistema de baterías de ión-litio para un vehículo eléctrico, evaluando su funcionamiento mediante simulaciones. Se desarrolla el modelo del vehículo asociado a una trayectoria típica dentro de la ciudad de Cuenca, para determinar los requerimientos de velocidad y potencia. Con esta información y una modelación detallada de la carga y descarga de las baterías, se determina su comportamiento considerando frenado convencional o regenerativo. Para este estudio se utilizan los indicadores SOC (State of Charge) y SOH (State of Health). Además, se presenta una serie de pruebas para obtener un análisis preciso de la autonomía del vehículo eléctrico, considerando ciclos de carga y descarga que pueden afectar al estado de salud de la batería y su vida útil.

ABSTRACT

This study proposes the design and modeling of a lithium-ion battery system for an electric vehicle, evaluating its operation through simulations. The vehicle model is developed based on a typical trajectory in the city of Cuenca to determine speed and power requirements. Using this information and a detailed modeling of battery charging and discharging, their behavior is determined considering both conventional and regenerative braking. The indicators State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) are utilized for this study. Additionally, a series of tests are conducted to obtain a precise analysis of the electric vehicle's range, considering charge and discharge cycles that can impact the health and life cycle of batteries.

PALABRAS CLAVES TEMÁTICAS

Frenado, Regenerativo, Reostático, Tracción, Vehículos eléctricos, Autonomía, SOC, SOH, Batería, Ion-Litio.

Índice general

1	CAPÍTULO 1: Introducción	14
1.1	Justificación	17
1.2	Grupo Objetivo	17
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo General	18
1.3.2	Objetivos Específicos	18
1.4	Metodología	18
2	CAPÍTULO 2: Fundamentos Teóricos	20
2.1	Vehículos eléctricos	20
2.2	Sistema de acumulación	21
2.2.1	Batería básica	24
2.2.2	Batería de ión-litio	26
2.2.3	Modelación de la batería ión-litio	27
2.2.3.1	Modelo eléctrico de la batería	27
2.2.3.2	Modelo térmico de la batería	29
2.2.3.3	Modelo electro-térmico acoplado a la batería	30
2.2.4	Estado de la batería ión-litio	31
2.2.4.1	SOC	31
2.2.4.2	SOH	32
2.3	Sistema de tracción	33
2.3.1	Motor síncrono	33
2.3.2	Control de par	35
2.3.2.1	Frenado regenerativo.	37
2.3.2.2	Modelación del sistema de tracción	39
3	CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta	42
3.1	Características del vehículo	42
3.2	Trazado de ruta	43
3.2.1	Análisis de ruta	43

Índice general

3.3	Selección del modelo de circuito equivalente	53
3.3.1	Dimensionamiento de parámetros iniciales de la batería	54
3.3.2	Adquisición de los componentes del modelo	56
3.3.3	Determinación del SOC	59
3.3.4	Cálculo del estado de salud (SOH)	59
3.3.5	Proceso de carga y descarga	60
4	CAPÍTULO 4: Simulaciones y Análisis de Resultados	62
4.1	Datos obtenidos en la ruta de conducción	63
4.2	Evaluación de la batería	66
4.2.1	Primera prueba	67
4.2.2	Segunda prueba	70
4.2.3	Tercera prueba	73
4.3	Frenado regenerativo	76
4.3.1	Primera prueba	76
4.3.2	Segunda prueba	80
4.3.3	Tercera prueba	84
4.4	Análisis de resultados	88
5	Conclusiones y Recomendaciones	89
5.1	Conclusiones	89
5.2	Recomendaciones	90
	Bibliografía	92

Índice de figuras

2.1	Esquema de un vehículo eléctrico	21
2.2	Esquema de una célula electro-química	24
2.3	Capacidad de la batería	25
2.4	Modelo de circuito equivalente de batería	29
2.5	Diagrama de bloques para el DTC clásico	35
2.6	Vectores espaciales de tensión en función de la conectividad del inversor	36
2.7	Simulación flujo del estátor mediante Matlab	36
2.8	Simulación del Par eléctrico mediante Matlab	37
2.9	Estado de conducción normal	38
2.10	Estado de frenado Regenerativo	39
2.11	Características de tracción	41
2.12	Característica de Regeneración	41
3.1	Trazado de ruta	43
3.2	Gráfica de Velocidad y Tiempo durante la ruta UPS - Condominio El Pacifico	46
3.3	Gráfica de Potencia y Elevación durante la ruta UPS - Condominio El Pacifico	47
3.4	Gráfica Potencia-Tiempo durante la ruta UPS - Condominio El Pacifico	48
3.5	Gráfica de Velocidad y Tiempo durante la ruta Condominio El Pacifico - UPS	50
3.6	Gráfica de Potencia y Elevación durante la ruta Condominio El Pacifico - UPS	51
3.7	Gráfica de Potencia-Tiempo durante la ruta Condominio El Pacifico - UPS	52
3.8	Esquema del modelo de circuito equivalente	53
4.1	Gráfica de Voltaje y Corriente sin utilizar frenado regenerativo durante la prueba 1	68

Índice de figuras

4.2	Gráfica de SOC y SOH sin utilizar frenado regenerativo durante la prueba 1	69
4.3	Gráfica de Voltaje y Corriente sin utilizar frenado regenerativo durante la prueba 2	71
4.4	Gráfica de SOC y SOH sin utilizar frenado regenerativo durante la prueba 2	72
4.5	Gráfica de Voltaje y Corriente sin utilizar frenado regenerativo durante la prueba 3	74
4.6	Gráfica de SOC y SOH sin utilizar frenado regenerativo durante la prueba 3	75
4.7	Gráfica de Voltaje y Corriente utilizando frenado regenerativo durante la prueba 1	77
4.8	Gráfica de SOC y SOH utilizando frenado regenerativo durante la prueba 1	79
4.9	Gráfica de Voltaje y Corriente utilizando frenado regenerativo durante la prueba 2	81
4.10	Gráfica de SOC y SOH utilizando frenado regenerativo durante la prueba 2	83
4.11	Gráfica de Voltaje y Corriente utilizando frenado regenerativo durante la prueba 3	85
4.12	Gráfica de SOC y SOH utilizando frenado regenerativo durante la prueba 3	87

Índice de tablas

2.1	Datos vehículo eléctrico	34
3.1	Características del vehículo	43
3.2	Parámetros ECM	54
4.1	Parámetros Ruta Universidad Politécnica Salesiana - Condominio El Pacífico - Parte A	63
4.2	Parámetros Ruta Universidad Politécnica Salesiana - Condominio El Pacífico - Parte B	64
4.3	Parámetros Ruta Condominio El Pacífico - Universidad Politécnica Salesiana - Parte A	65
4.4	Parámetros Ruta Condominio El Pacífico - Universidad Politécnica Salesiana - Parte B	66
4.5	Resultados de pruebas	88

1 CAPÍTULO 1: Introducción

Desde el siglo XIX la humanidad ha realizado números esfuerzos para obtener vehículos de tracción utilizando diferentes tipos de máquinas. Entre los primeros diseños se planteó la utilización de motores eléctricos que estaban en pleno desarrollo, en 1835, se presentó el primer vehículo de propulsión eléctrica, creado por Sibrin-dus Stratingh y posteriormente construido en Groningen, Países Bajos, por su colaborador Cristopher Becker. [1].

Chancusig [1], en 1842, Thomas Davenport y Robert Davison fueron los responsables de la construcción de los primeros vehículos eléctricos utilitarios. Sin embargo, estos vehículos presentaron la limitación de contar con baterías no recargables y disponían de niveles de carga muy reducidos, por lo que su funcionalidad fue limitada.

En la ciudad de Viena, Jacob Lohner & Co. [2], fabricó vehículos eléctricos entre 1898 y 1906. Durante ese periodo, Ferdinand Porsche, quien trabajaba para la compañía, diseñó un mecanismo que transmitía la potencia de los motores a las ruedas de manera directa, minimizando las pérdidas de energía. Estos vehículos, llamados Loher-Porsche, estaban equipados con motores individuales de $2,5CV$ cada uno, llegando a un total combinado de $7CV$. Estos vehículos permitían alcanzar una velocidad de crucero de $15km/h$ y una velocidad máxima de $50km/h$.

A medida que las tecnologías avanzan, como la inteligencia artificial, y aumenta la preocupación por la conservación y sostenibilidad del medio ambiente, los vehículos eléctricos y autónomos se han convertido en el enfoque central tanto para la industria automotriz como para las instituciones de investigación [3].

En los últimos tiempos, ha surgido un gran interés a nivel global en la adopción de vehículos eléctricos como una potencial solución al problema del calentamiento global. Esto se debe a la capacidad de estos vehículos para disminuir las emisiones de gases perjudiciales generados por el consumo directo de combustibles fósiles en los vehículos tradicionales. Con esto se pretende reducir la dependencia de este recurso contaminante y no renovable [1].

En la actualidad, la adopción de energía renovable se ha vuelto esencial para preservar el medio ambiente. Los automóviles eléctricos son capaces de generar cero

emisiones, lo que contribuye a disminuir la contaminación del aire provocada por el transporte. No obstante, las baterías representan un desafío en los vehículos eléctricos. Por consiguiente, el sistema de frenado regenerativo permite recuperar la energía acumulada en la masa y la velocidad del vehículo [4].

El frenado regenerativo presenta un mecanismo para aumentar la autonomía de las baterías y reducir el consumo de energía. Debido a que este tema se investiga y desarrolla ampliamente, se proponen muchos métodos de control, que se centran en las condiciones óptimas de velocidad y par de frenado, para mejorar el rendimiento de los vehículos eléctricos. Actualmente, se puede estimar que la eficiencia de frenado regenerativo está en los límites del 20 % [5].

Según Heydari [3], el desempeño del frenado regenerativo en un automóvil eléctrico está sujeto a diversos elementos, como el estilo de conducción del conductor y las circunstancias de la ruta.

Liang [6], propone una estrategia eficiente de control de recuperación de energía basada en un control predictivo de un modelo no lineal modificado que permite equilibrar la seguridad y eficiencia al momento de frenar el vehículo.

Yang [7], indica que la acción del frenado regenerativo emplea principalmente la fuerza electromotriz existente en el motor, la cual es utilizada para recargar la batería durante el proceso de frenado regenerativo, sin embargo Zang [8], afirma que es indispensable la coexistencia de sistemas de frenado convencionales basados en fricción.

En el presente, los automóviles eléctricos emplean baterías de ion-litio que dependen del cobalto como elemento esencial. No obstante, el cobalto es un recurso costoso y presenta inestabilidad térmica [9]. Como alternativa viable, se propone reemplazar el cobalto por manganeso, ya que los electrodos de óxido de manganeso ofrecen una mayor estabilidad y son más económicos. Estas baterías se recargan a través de la red eléctrica, aprovechando la regeneración de energía durante el frenado y la integración de paneles solares fotovoltaicos en los puntos de carga.

Con el fin de abordar el desafío de la autonomía de los vehículos eléctricos sin aumentar la capacidad de las baterías, se plantea la opción de implementar una infraestructura extensa de puntos de carga rápida. Sin embargo, es importante asegurarse de que esta forma de recarga no genere una degradación o reducción significativa en la vida útil de las baterías [10].

Las baterías de iones de litio ofrecen notables ventajas en los automóviles eléctricos, tanto por su costo, durabilidad prolongada y alta capacidad de almacenamiento de energía. No obstante, las propiedades electro-químicas de las baterías de litio-ion

1 CAPÍTULO 1: Introducción

presentan cambios complejos, como histéresis, variaciones significativas en el tiempo y comportamientos no lineales, entre otras características. [11].

Los vehículos eléctricos tienen como contrapartida la sobrecarga y la descarga profunda de las baterías. Un sistema de gestión (BMS) garantiza la seguridad, fiabilidad, eficiencia y durabilidad de la batería, permitiendo un funcionamiento seguro. Además, el BMS también proporciona información sobre la batería, como el estado de carga (SOC) y el estado de salud (SOH). El SOC del BMS proporciona el porcentaje de capacidad de la batería, mientras que el SOH evalúa la condición de la batería. Para estimar los estados cruciales de la batería, el BMS utiliza tres mediciones de la batería: tensión, corriente y temperatura [12].

Por lo tanto, resulta fundamental adquirir datos precisos acerca del estado de carga SOC de las baterías de ión-litio, lo cual requiere contar con un modelo de batería equivalente confiable.

La eficiencia del sistema de frenado regenerativo se ve afectada por algunas variables, como la geografía de la carretera, las velocidades iniciales de frenado, el uso del freno y la masa del vehículo. Estos factores desempeñan un papel determinante en la eficiencia del sistema [13].

A su vez Araujo [14], apoya que con el aporte de los frenos regenerativos, se disminuye el desgaste de los frenos mecánicos, se disipa menos calor y se aprovecha la energía de una forma más eficiente.

Al introducir vehículos eléctricos, es crucial considerar el aumento en el consumo energético que requieren de la red eléctrica. Es fundamental gestionar este incremento de manera adecuada, al mismo tiempo que se busca mejorar la eficiencia energética del sistema eléctrico [1].

Se necesita más investigación en frenado regenerativo para crear un mejor sistema que permita extraer más energía y reducir el tiempo de frenado. La aplicación de inteligencia artificial puede aportar mejoras al control. Los investigadores están trabajando en la regeneración de pilas de combustible regenerativas unificadas (URFC) para tener un sistema ligero, con buena densidad de energía y rentable [4].

Los automóviles eléctricos deben ser capaces de operaciones de largo alcance. Este objetivo se puede alcanzar con baterías de alta capacidad, pero también con una gestión energética adecuada. Resulta conveniente utilizar energía cinética acumulada en la masa del automóvil durante el proceso de frenado [15].

Cajo [16], afirma que los automóviles eléctricos representan la única opción para lograr un transporte urbano más limpio, eficiente y con menor impacto ambiental.

En un futuro próximo, el freno será y debe ser, regenerativo desde los puntos de

vista de la ecología y más fácil mantenimiento del sistema de frenado para todo tipo de unidades [17].

1.1. Justificación

El presente trabajo se enfocará en el análisis de la operación de vehículos eléctricos, principalmente en el funcionamiento de un sistema de frenado regenerativo, con el fin de evaluar la autonomía del vehículo eléctrico cuando esta utilizando este tipo de frenado.

Este estudio analiza la autonomía y las prestaciones de las baterías de ión-litio, mediante el diseño de una ruta en condiciones de tránsito, donde el vehículo eléctrico opera en condiciones de tracción y frenado, con diferentes rutas y pendientes.

Este tema de investigación tiene el propósito de beneficiar a propietarios de vehículos eléctricos, debido a que con el mismo ahorrarán energía con mejoras en rendimiento y prestaciones. Además, se espera en un futuro que la mayoría de vehículos que circulan en el país sean eléctricos, reduciendo de esta forma los problemas de contaminación ambiental.

1.2. Grupo Objetivo

Con el presente estudio se beneficia el grupo de investigación debido a la información que se va a obtener con nuevas herramientas sobre este tipo de técnicas. También son beneficiarios de esta investigación los propietarios de vehículos al contar con tecnologías más acordes que las actuales, debido a que podrán ahorrar energía con mejores rendimientos y prestaciones. Los ingenieros mecánicos y eléctricos tendrán un mayor conocimiento de las técnicas para desarrollar elementos adecuados para los vehículos. Por otra parte, los fabricantes se beneficiarán al contar con conocimiento adicionales para permitir la evolución de sus productos. Otros beneficiados de esta investigación pueden ser los emprendedores y empresas que quieran hacer contribuciones relativas a la tracción y frenado de vehículos eléctricos. La calidad de vida de las personas se verá mejorada, debido que habrá menos contaminación del medio ambiente y las futuras generaciones que estudien dicha problemática para tener un mayor entendimiento de las estrategias.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Analizar la capacidad de conducción y el rendimiento de un vehículo eléctrico con baterías en distintas rutas, considerando las condiciones de tracción, frenado reostático y frenado regenerativo.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Reconocer los hábitos de conducción más comunes de los conductores de automóviles convencionales y las diferencias existentes al utilizar vehículos eléctricos. (Investigación bibliográfica).
- Modelar un vehículo eléctrico a baterías, en condiciones de tránsito, donde se opere en tracción y frenado, en diferentes rutas y pendientes.
- Evaluar el incremento en la autonomía del vehículo eléctrico cuando se utiliza frenado regenerativo durante los trayectos donde esta posibilidad es factible
- Analizar el efecto del frenado reostático y regenerativo en el comportamiento y vida útil del sistema de baterías.

1.4. Metodología

El presente proyecto se desarrollará aplicando el método científico en ingeniería. Se realizará un análisis cuantitativo de modelos sistemáticos obtenidos mediante simulaciones numéricas del comportamiento de un vehículo eléctrico accionado mediante baterías. Este modelo incluirá aspectos relevantes sobre el comportamiento del conductor del vehículo, las rutas de circulación, el tráfico, las pendientes, el comportamiento de los modos de operación del vehículo en tracción, frenado reostático y regenerativo. El propósito de este estudio consiste en examinar el impacto que diferentes métodos de frenado tienen tanto en la autonomía como en la durabilidad de las baterías.

Uno de los aspectos relevantes sobre la autonomía y la vida útil de los vehículos eléctricos está influida por el comportamiento de los conductores durante el tránsito desde el origen al fin de su destino. Por esta razón, la primera etapa de este proyecto se centrará en realizar una investigación bibliográfica sobre las diferencias en la conducción que existen entre los vehículos convencionales, accionados mediante

1 CAPÍTULO 1: Introducción

combustibles fósiles y los vehículos eléctricos con baterías [18]. De este análisis se obtendrán datos relevantes para modelar el comportamiento de los conductores, los cuales podrán ser utilizados posteriormente en la simulación de estos vehículos en determinados trayectos.

En la segunda etapa de este proyecto se realizará una simulación sistemática y detallada de las diferentes partes que constituyen el vehículo eléctrico. En esta simulación se incluirán los aspectos dinámicos y cinemáticos del vehículo, sus prestaciones, el sistema de tracción y frenado, así como la modelación del sistema de baterías ante procesos de carga y descarga [19, 20].

En la tercera etapa, se utilizará el algoritmo desarrollado para analizar el comportamiento del vehículo en ruta. El principal objetivo de esta etapa consiste en determinar la autonomía y las prestaciones del vehículo, sometido a condiciones de tránsito convencional [21].

Finalmente, se estudiará el efecto que la ruta y el comportamiento del vehículo tienen sobre el sistema de acumulación de energía mediante baterías. Es importante en esta etapa evaluar el incremento de la autonomía cuando se utiliza el frenado regenerativo y los efectos negativos que este puede ocasionar sobre la vida útil y capacidad de recarga del sistema de acumulación [22].

Con toda la información recopilada, se elaborará el trabajo final de grado que incluirá, la investigación sobre el comportamiento del conductor en tránsito, la modelación del vehículo eléctrico, el estudio de la autonomía y prestaciones del mismo en rutas preseleccionadas, así como el impacto que puede tener el frenado reostático o regenerativo en la vida útil de los acumuladores.

2 CAPÍTULO 2: Fundamentos Teóricos

En el presente proyecto se describirá cuantitativamente el funcionamiento de un vehículo eléctrico y sus componentes, lo cual permitirá analizar su comportamiento durante la tracción el frenado, tanto regenerativo como resistivo. Se realizará una modelación completa del vehículo, incluyendo entre otros elementos: la tracción, el frenado regenerativo, el análisis de rutas y la estrategia de conducción.

En la actualidad, los vehículos eléctricos se presentan como una elección evidente para combatir la contaminación. A nivel mundial, el creciente respaldo de estos vehículos ha generado un gran entusiasmo, tanto por su potencial como una respuesta al cambio climático al reducir las emisiones de gases perjudiciales, como por su habilidad para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, recursos considerados no renovables.

2.1. Vehículos eléctricos

Los vehículos de tracción eléctrica se caracterizan por tener un motor eléctrico principal que está conectado al eje de tracción. También es posible encontrar vehículos con motores individuales acoplados a cada una de las ruedas. Estos motores se encargan de transformar la energía cinética en electricidad y viceversa. Esta transformación permite tanto la propulsión del vehículo como la recarga de la batería a través del frenado regenerativo. La batería suministra la energía eléctrica necesaria para activar el motor del automóvil. Los vehículos eléctricos con un solo motor se adaptan de manera más óptima al diseño convencional, lo que permite emplear un motor eléctrico de mayor capacidad y eficiencia. Por otro lado, la implementación de motores independientes en cada rueda reduce o elimina las pérdidas de transmisión, aunque estos son más adecuados para vehículos pequeños donde no se requieren altas potencias [1].

La Fig. 2.1 presenta el esquema básico de una vehículo eléctrico. En este esquema se muestra la batería, el sistema de carga, el convertidor de corriente continua a corriente alterna, la unidad de control, el sistema de transmisión y el motor/generador que

proporciona la tracción y los diferentes tipos de frenado reostático y regenerativo.

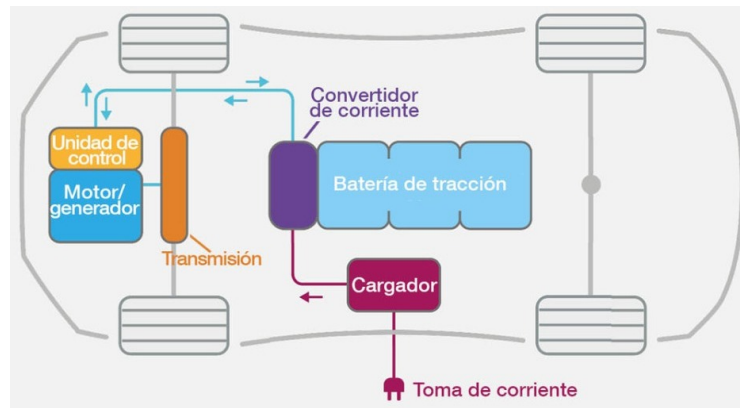


Figura 2.1: Esquema de un vehículo eléctrico

2.2. Sistema de acumulación

El sistema de almacenamiento de energía de un vehículo eléctrico se basa en el empleo de baterías electro-químicas. Estas baterías pueden ser de diversos tipos y materiales. En la actualidad existen grandes desarrollos en esta área, donde se busca reducir peso y aumentar la densidad de carga [23].

La duración de la batería está principalmente determinada por la velocidad de consumo de energía del dispositivo. Sin embargo, reducir el índice de consumo medio no es la única forma de aumentar la vida útil de este acumulador. Debido a los efectos físicos no lineales de estos sistemas, la vida útil también depende del patrón de carga y descarga utilizado durante su operación. Durante los periodos de alto consumo de energía, la capacidad efectiva de la batería se degrada y por lo tanto, la vida útil se acorta. Por otro parte, durante los periodos sin consumo de energía, la batería puede recuperar parte de su capacidad perdida y la vida útil se puede alargar [22].

M.R. Jongerden y B.R. Haverkort [24], proponen diferentes enfoques para modelar las propiedades de las baterías, desde modelos petroquímicos muy detallados, hasta modelos estocásticos de alto nivel. Ese trabajo evalúa la idoneidad de estas representaciones para combinarlos con un modelo que permita evaluar el rendimiento y la autonomía del vehículo eléctrico. Una de estas propuestas resulta ser muy adecuada para el propósito de este proyecto y se presenta en la Fig. 2.2. En la literatura se presentan principalmente dos modelaciones de las baterías cinéticas que consideran los efectos no lineales de su comportamiento.

El primer modelo es el de difusión planteado por Rakhmatov y Vrudhula [25, 24, 26].

1. Modelo de difusión de Rakhmatov y Vrudhula: Un modelo analítico de batería basado en la difusión de los iones en el electrolito ha sido desarrollado por Rakhmatov y Vrudhula. El modelo describe la evolución de la concentración de las especies electro-activas en el electrolito para predecir la vida útil de la batería bajo una carga determinada.

La concentración de la especie electro-activa en el tiempo t y la distancia $x \in [0, w]$ se denomina $C(x, t)$.

Para la batería completa, la concentración es constante a lo largo del electrolito: $C(x, 0) = C^*$, $x \in [0, w]$.

La pila se considera vacía cuando $C(0, t)$ cae por debajo del nivel de corte C_{cutoff} . La evolución de la concentración se describe mediante las leyes de Fick [25].

$$\begin{cases} -J(x, t) & = D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x}, \\ \frac{\partial C(x, t)}{\partial t} & = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (2.1)$$

donde $J(x, t)$ es el flujo de la especie electro-activa en el tiempo t y la distancia x del electrodo, y D es la constante de difusión. El flujo en la superficie del electrodo ($x = 0$) es proporcional a la corriente $i(t)$. El flujo en el otro lado de la región de difusión $x = w$, es igual a cero. Esto conduce a las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \frac{i(t)}{\nu F A}, \\ D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=w} &= 0, \end{aligned} \quad (2.2)$$

donde A es el área de la superficie del electrodo, F es la constante de Faraday y ν es el número de electrones que participan en la reacción electro-química en la superficie del electrodo.

Es posible obtener una solución analítica para este conjunto de ecuaciones diferenciales (2.1), unido con la condición inicial y las condiciones de contorno (2.2), utilizando las transformadas de Laplace. A partir de esa solución se puede obtener una expresión para la carga aparente que pierde la batería, $\sigma(t)$:

$$\sigma(t) = \int_0^t i(\tau) d\tau + \int_0^t i(\tau) \left(2 \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\beta^2 m^2 (t-\tau)} \right) d\tau \quad (2.3)$$

donde $\beta = \pi \sqrt{D/w}$. La carga aparente perdida se separa en dos partes, la carga

perdida por la carga $l(t)$ y la carga no disponible $u(t)$. La primera es la carga utilizada por el dispositivo. La segunda es la carga que permanece en la batería no utilizada. La batería está vacía cuando la carga aparente perdida es igual a la capacidad de la batería. Para una corriente constante I en (2.3), puede resolverse fácilmente. Para $l(t)$, se obtiene $l(t) = It$. Para la carga no disponible se puede intercambiar la integral y la suma, lo que lleva a:

$$u(t) = 2I \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\beta^2 m^2 t}}{\beta^2 m^2}. \quad (2.4)$$

Durante los periodos de inactividad la carga no disponible disminuirá y estará disponible de nuevo para la carga. Se puede calcular la función que describe la evolución de la carga no disponible durante un período de inactividad después de una carga I que duró un período de duración t_i :

$$u(t) = 2I \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\beta^2 m^2 t_i} (1 - e^{-\beta^2 m^2 t})}{\beta^2 m^2}, \quad (2.5)$$

donde t_i es el tiempo de inactividad.

El otro modelo analítico que puede utilizarse para determinar la vida útil de las baterías se denomina modelo cinético de batería (KiBaM) de Manwell y McGowan [27]. El KiBaM es un modelo de batería muy intuitivo, donde la carga de la batería se distribuye en dos pozos: el pozo de carga disponible y el de carga limitada [27, 26].

El pozo de carga disponible suministra electrones directamente a la carga $i(t)$, mientras que el de carga ligada suministra electrones solo al de carga disponible. La velocidad a la que la carga fluye entre los pozos depende de la diferencia de altura y al parámetro k . Las alturas de los dos pozos vienen dadas por: $h_1 = \frac{y_1}{c}$ y $h_2 = \frac{y_2}{1-c}$. El cambio de la carga en ambos pozos se obtiene mediante el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} &= -i(t) + k(h_2 - h_1), \\ \frac{dy_2}{dt} &= -k(h_2 - h_1), \end{cases} \quad (2.6)$$

con condiciones iniciales $y_1(0) = c \times C$ y $y_2(0) = (1 - c) \times C$, donde C es la capacidad total de la batería.

Se considera que la batería está vacía cuando no queda carga en el pozo de carga disponible. Cuando se aplica una carga a la batería, la carga disponible se reduce y la diferencia de altura entre los dos pozos crece. Cuando se retira la carga, la carga fluye

desde el pozo de carga limitada al pozo de carga disponible hasta que h_1 y h_2 vuelvan a ser iguales. Así, durante un periodo de inactividad, hay más carga disponible y la batería dura más que cuando se aplica la carga de forma continua. De este modo el efecto de recuperación se tiene en cuenta en el modelo. También se cubre el efecto de la capacidad de carga de capacidad, debido a que con una corriente de descarga más alta, el pozo de carga disponible se agotará más rápido, habrá menos tiempo disponible para que la carga ligada fluya a la carga disponible. Por lo tanto, quedará más carga sin utilizar, y la capacidad efectiva disminuirá.

2.2.1. Batería básica

Una batería está formada por una o varias celdas electro-químicas, conectadas en serie o en paralelo. En estas celdas la energía almacenada químicamente se convierte en energía eléctrica mediante una reacción electro-química. La Fig.2.2 muestra un esquema de una pila electro-química.

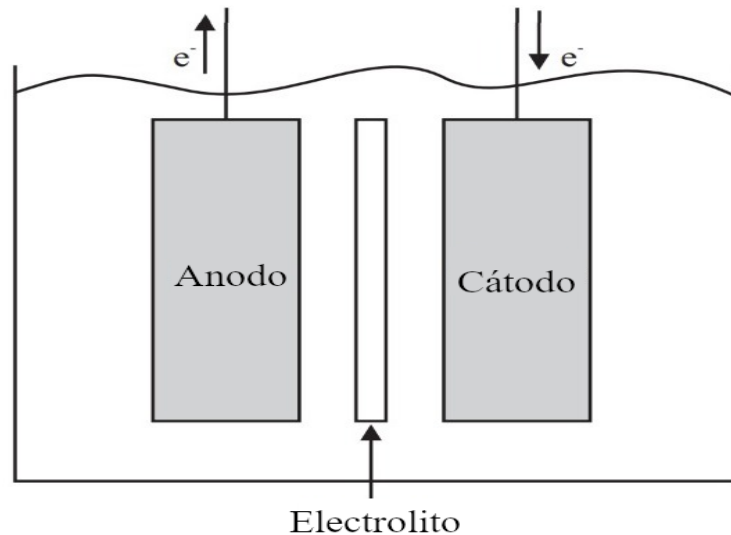
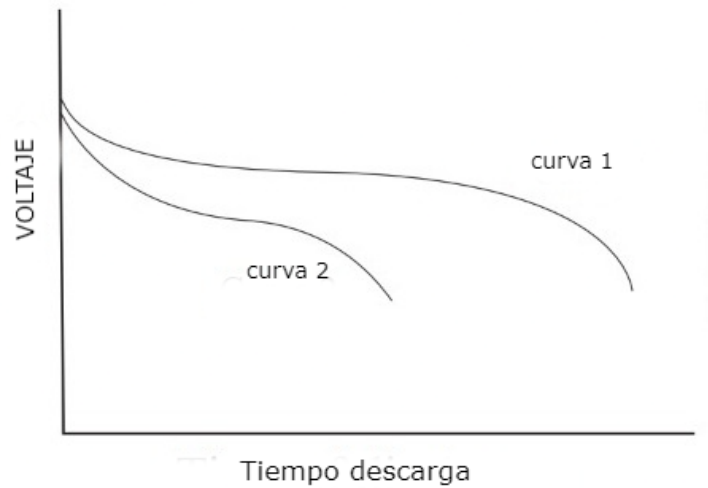


Figura 2.2: Esquema de una célula electro-química

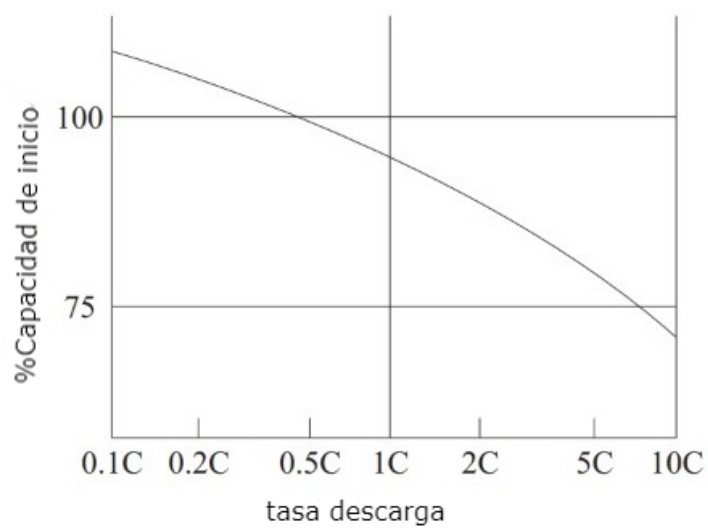
Una célula se compone de un ánodo, un cátodo y un electrolito que actúa como separador entre los dos electrodos. Durante el proceso de descarga, se produce una reacción de oxidación en el ánodo. La modelización del comportamiento de las baterías es compleja, debido a los efectos no lineales durante descarga. En el caso ideal, la tensión permanece constante durante la descarga, con una caída instantánea a cero cuando la batería está descargada totalmente. La capacidad ideal sería constante pa-

2 CAPÍTULO 2: Fundamentos Teóricos

ra todas las corrientes de descarga y se utilizaría toda la energía almacenada en este dispositivo. Sin embargo, para una batería real, la tensión cae lentamente durante la descarga y la capacidad efectiva disponible se muestra en la Fig. 2.3.



(a) Tiempo de descarga



(b) Razón de descarga

Figura 2.3: Capacidad de la batería

La Fig. 2.3a, muestra la evolución de la tensión en el tiempo para una corriente

de descarga baja representada en la curva 1 y alta en la curva 2. La tensión cae más rápido para corrientes de descarga elevadas. La Fig. 2.3b muestra la capacidad en función de la velocidad de descarga. La velocidad de descarga se indica en términos de índice C , un índice $C=2$, significa que la batería se descarga en 1/2 hora. Las capacidades medidas se dan en relación con la capacidad a la tasa de descarga de 2 horas, $C = 0,5$. En la Fig. 2.3b, se muestra que la capacidad efectiva disminuye para tasas de descarga elevadas [26].

2.2.2. Batería de ión-litio

A lo largo de los años, se han empleado diversos tipos de baterías en los vehículos eléctricos. En la actualidad, las baterías de iones de litio son ampliamente reconocidas como un sistema de almacenamiento altamente ventajoso debido a su baja densidad de peso, alto voltaje de celda, excelente conductividad eléctrica y alta eficiencia electro-química. En comparación con otras baterías como las de *NiMH*, *NiCd* y Plomo-ácido. Las baterías de iones de litio presentan diversas variaciones en su composición química, pero todas comparten un rasgo común: la presencia de iones de litio que se desplazan dentro del electrolito. A pesar de que pueden parecer similares a primera vista, estas baterías presentan diferencias en términos de rendimiento y características debido a la elección de los materiales activos, principalmente en el cátodo (siendo comúnmente el ánodo de grafito). Esto les otorga atributos únicos [28].

Características de las baterías de ión-litio Las baterías de iones de litio son el método más utilizado para vehículos híbridos y totalmente eléctricos, electrodomésticos y aparatos portátiles, debido a su inigualable energía y densidad de potencia. Las tecnologías de baterías anteriores al litio, como las de níquel o plomo-ácido, suelen tener una baja densidad energética en comparación con las avanzadas baterías de iones de litio de última generación. Al sustituir la mayor cantidad posible de vehículos de combustible, las baterías de litio tienen el potencial de reducir de manera significativa las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas baterías se emplean en diversas aplicaciones dentro de las redes eléctricas debido a su eficiencia energética destacada y la capacidad de potenciar la cantidad de energía extraída de fuentes renovables, como la geotérmica, solar, eólica e hidroeléctrica. Esto permite su adopción generalizada y contribuye al fomento de una economía energética sostenible.

El controlar el estado de salud y la seguridad de la batería, es componente necesario en la mayoría de las aplicaciones del mundo real. En enormes paquetes de

baterías, incluidos los vehículos eléctricos y las centrales que ahorran la energía de la batería. No es aconsejable sobrecargar o sobre-descargar las baterías utilizadas, si esto ocurre, las baterías y ocasionalmente los usuarios resultan dañados. El voltaje de funcionamiento seguro, corriente y la limitación de la temperatura, junto con las funciones principales para proteger y salvaguardar las baterías. Los sistemas de gestión de baterías (BMS) que supervisan la salud y la seguridad de las baterías, ahora cuentan con funciones adicionales que mejoran el rendimiento y la seguridad de las mismas. Estas capacidades engloban el monitoreo de la temperatura, la administración de la carga, el equilibrio de las celdas y la estimación tanto del estado de carga (SOC) como del estado de salud (SOH). Además, el modelado de las baterías, particularmente los modelos basados en aprendizaje automático, deben ofrecer una representación que refleje fielmente las propiedades electro-químicas de las baterías. [29].

2.2.3. Modelación de la batería ión-litio

El diseño y control del estado de la batería generalmente comienza con la construcción de un modelo apropiado. A lo largo del tiempo, se han creado múltiples modelos de baterías que son precisos y complejos en su naturaleza [30].

Estos modelos pueden clasificar principalmente como:

1. modelo eléctrico de batería.
2. modelo térmico de batería.
3. modelo electro-térmico acoplado a la batería.

2.2.3.1. Modelo eléctrico de la batería

Los modelos eléctricos de baterías incluyen principalmente el modelo electro-químico, de orden reducido, de circuito equivalente y el modelo basado en datos. Para modelo electro-químico, MA Rahman, S Anwar, A Izadian [31], afirmaron que el modelo electro-químico de la batería debe tener la capacidad de capturar la dinámica espacio temporal de la concentración de la pila, el potencial del electrodo para cada fase y la cinética Butler-Volmer para controlar la reacción de intercalación. A continuación, se establece un modelo electro-químico para describir el comportamiento electro-químico de la batería mediante el método de optimización (PSO) para optimizar los parámetros críticos del modelo. W Sung, CB Shin [32], demostraron que el modelo electro-químico presentaba una predicción muy precisa, pero requería un esfuerzo

computacional significativo en simulación del modelo. La principal ventaja de utilizar un modelo electro-químico es que se puede obtener una descripción muy precisa de los procesos de la batería. Sin embargo, muchos parámetros relacionados con la electro-química de la pila como las composiciones químicas, lo que es prácticamente difícil de conseguir en aplicaciones en tiempo real. Además, estos modelos electro-químicos suelen implicar ecuaciones diferenciales parciales que deben resolverse, lo que conlleva una gran sobrecarga computacional. Haciendo las suposiciones adecuadas, los modelos electro-químicos de orden completo pueden aproximarse mediante modelos de orden reducido. Por ejemplo, Xuebing Han [33] propusieron un método aproximado para capturar la difusión de la fase sólida y la distribución de la concentración del electrolito en la batería. El modelo electro-químico simplificado basado en la física para estimar el *SOC* de una batería de iones de litio. Changfu Zou [34], propusieron un modelo electro-químico de orden reducido para baterías $LiFePO_4$ para predecir la capacidad de descarga en diversas condiciones, a continuación, se consiguió una estimación robusta del *SOC* basada en este de orden reducido. Aunque este enfoque conlleva pérdida de información en los modelos simplificados de orden reducido, son más deseables para las aplicaciones en tiempo real de las baterías.

En la Fig.2.4 se ilustra un marco típico de modelo de circuito equivalente de batería. Las redes de resistencias-condensadores *RC* del modelo de circuito equivalente están relacionados con los comportamientos eléctricos de la batería, como la transferencia de carga o los procesos de difusión. El número de redes *RC* se considera el orden del modelo y debe seleccionarse cuidadosamente. Se ha demostrado que los modelos de primer y segundo orden son más populares, y los modelos de orden superior en muchos casos no son necesarios. S. Nejad [35], presenta una revisión crítica de los modelos de circuito equivalente de parámetros de batería comúnmente utilizado. Los resultados de la comparación muestran que los modelos de red *RC* rendimiento dinámico, especialmente para las predicciones potencia.

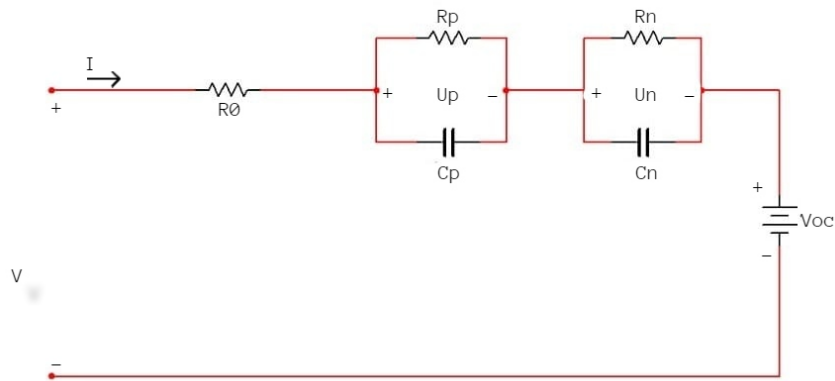


Figura 2.4: Modelo de circuito equivalente de batería

Los modelos basados en datos intentan captar la relación entre las señales de entrada y salida de las baterías. Se han adoptado varios modelos basados en datos, como las redes neuronales [36] y las máquinas de vectores de soporte (SVM), para describir las señales de entrada y salida de las baterías. El rendimiento de los modelos basados en datos de baterías depende en gran medida de los datos de prueba y de los métodos de entrenamiento. Para lograr una precisión aceptable del modelo, así como una buena capacidad de generalización, los datos de prueba deben cubrir rangos de funcionamiento de la batería, y los parámetros de los enfoques de entrenamiento. Además, los de datos adaptativos pueden utilizarse para obtener mejores resultados en el modelado de baterías.

2.2.3.2. Modelo térmico de la batería

La temperatura es un elemento crucial en el BMS, encargado de monitorear el estado de salud de la batería en los vehículos eléctricos, ya que desempeña un papel fundamental en el rendimiento y la duración de la batería. Diversos modelos, como el modelo de generación de calor, el modelo de transferencia de calor, el modelo térmico de orden reducido y el modelo basado en datos, se han desarrollado para capturar el comportamiento térmico de las baterías. En cuanto al modelo de generación de calor, existen técnicas para describir cómo se produce el calor en una batería, como la activación, la concentración y las pérdidas óhmicas, las cuales se distribuyen de manera no homogénea dentro de la batería. Tres enfoques populares para evaluar la generación de calor en las baterías se ilustran en la ecuación 2.7, que han sido aplicadas en tiempo real.

$$\begin{cases} Q_1 = RI^2 \\ Q_2 = I(V - OCV) \\ Q_3 = I(V - OCV) + IT \frac{dOCV}{dT} \end{cases}, \quad (2.7)$$

donde R es la resistencia interna de la batería, I y V significan corriente y tensión de la batería, respectivamente, OCV es la tensión de circuito abierto de la batería, Q_1 representa la generación de calor de la batería que atraviesa la resistencia interna de la batería, Q_2 representa la generación de calor de la batería causada por los sobre-potenciales a través de la red RC , Q_3 representa la generación de calor de la batería causada por el cambio de entropía y el calentamiento de Joule [30][37].

2.2.3.3. Modelo electro-térmico acoplado a la batería

Existe un fuerte acoplamiento entre los comportamientos eléctrico y comportamiento térmico. Para capturar los comportamientos de la batería por ejemplo: corriente, voltaje, SOC y los comportamientos térmicos como por ejemplo: la temperatura superficial e interna, simultáneamente, se han desarrollado varios modelos electro-térmicos acoplados, incluyendo tanto modelos de parámetros parciales como modelos de parámetros distribuidos [38]. Además, Goutam S. [39] propuso un modelo electro-térmico tridimensional para estimar el SOC de la batería y calcular la generación de calor. Este modelo acoplado consta de un modelo de distribución de potencial $2D$ y un modelo de distribución de temperatura. A continuación, el SOC de la batería y la distribución de temperatura tanto con corrientes constantes como dinámicas se calculan eficazmente a partir de este modelo acoplado. Jiang J, Ruan H, Sun B.[40] propusieron un modelo electro-térmico reducido de baja temperatura y validado por baterías con tres materiales de cátodo.

Este modelo reducido es lo suficientemente preciso para desarrollar un calentamiento rápido y una carga óptima condiciones de baja temperatura.

Se ha desarrollado un modelo tridimensional electro-térmico acoplado que permite analizar cómo diferentes operaciones de la batería, como el flujo de refrigerante y la corriente de descarga, afectan la temperatura de la batería. Mediante el análisis de este modelo acoplado, se ha confirmado que la resistencia de contacto desempeña un papel crucial en la temperatura de la batería.

2.2.4. Estado de la batería ión-litio

Esta sección detalla una estimación del estado de las baterías, centrándose en los estados clave de la batería, como *SOC*, *SOH*, la temperatura interna y la estimación conjunta del estado.

2.2.4.1. SOC

SOC significa la capacidad restante de la batería como un porcentaje del total, es decir, 100% significa que la batería está totalmente cargada hasta su capacidad total y 0% significa que la batería está totalmente descargada. Una estimación precisa del *SOC* desempeña un papel vital en el control del estado de la capacidad para garantizar el funcionamiento seguro y saludable de la batería [41]. En términos generales, se han desarrollado dos enfoques para la estimación del *SOC*, que se clasifican como enfoque de estimación directa y enfoque basado en modelos. Para estimación directa, se basa en las mediciones directas de la corriente y la tensión de la batería, el *SOC* se calcula principalmente mediante dos métodos diferentes: el método del amperio hora (*Ah*) o método de recuento de culombios y el método basado en la tensión de circuito abierto (OCV). El método *Ah* es un método sencillo para calcular el *SOC*, que se ilustra en la ecuación 3.10 como:

$$SOC(k) = SOC(K_0) + \int_{k_0}^k \eta I(t) dt / C_n \quad (2.8)$$

donde $SOC(k_0)$ es el *SOC* inicial conocido, η representa la eficiencia de carga o descarga de la batería, C_n representa la capacidad nominal de la batería, $I(t)$ es el valor de la corriente que es positivo para la carga y negativo para la descarga. Dado que la corriente de carga o descarga puede medirse fácilmente, el método *Ah* es una opción sencilla para la estimación del *SOC*. Sin embargo, el método *Ah* depende en gran medida de las mediciones de corriente, y la acumulación de errores a lo largo del tiempo afectará significativamente a la precisión de la estimación. Además, es difícil determinar el *SOC* inicial en aplicaciones en tiempo real, especialmente cuando la batería solo se carga dentro de un rango limitado, por ejemplo, 10%- 90%. Las calibraciones del *SOC* inicial y de la corriente se convierten en los para adoptar el método *Ah* de estimación del *SOC*.

2.2.4.2. SOH

Una descripción general del *SOH* de la batería es la siguiente ecuación 2.9:

$$SOH(t) = SOH(t_0) + \int_{t=t_0}^t \delta_{func}(I, T, SOC, otros) d\tau, \quad (2.9)$$

donde $SOH(t_0)$ representa el *SOH* inicial de la batería, δ_{func} es una función de tasa de envejecimiento, que depende fuertemente de varios factores como la corriente, la temperatura, el *SOC*, otros representan otros factores de estrés como las vibraciones mecánicas y la sobretensión.

Para aplicaciones de vehículos eléctricos, el envejecimiento de la batería provocará la degradación de la capacidad de la batería y el aumento de su resistencia interna de la batería. Por tanto, el *SOH* de la batería puede estimarse por la resistencia interna o la capacidad utilizable como un tipo de cambios de régimen de predicción en el campo de la informática [42]. Se han propuesto numerosos enfoques para estimar *SOH* de la batería, que se clasifican en tres grupos, a saber, métodos sin modelo, basados en modelos y de minería de datos. Para el método sin modelo, dado que la capacidad envejecida o el aumento de la resistencia interna R_{inc} , el *SOH* de la batería puede definirse simplemente como:

$$\begin{cases} SOH & = C_{aged}/C_n \times 100\%, \\ SOH & = R_{inc}/R_n \times 100\%, \end{cases}, \quad (2.10)$$

donde C_n y R_n representan la capacidad nominal y la resistencia interna de la batería nueva sin utilizar. Según la definición de *SOH* de la ecuación 2.10, se puede aplicar la prueba de capacidad estándar [43] o la prueba de corriente de impulso para medir el envejecimiento de la capacidad de la batería y el aumento de la resistencia interna. Sin embargo, este método directo es inconveniente y no se recomienda porque la descarga completa con corriente y temperatura controladas interrumpiría el funcionamiento normal del vehículo eléctrico.

En comparación con las mediciones directas de C_{aged} y R_{inc} , la batería espectroscopia de impedancia electro-química de la batería puede sin duda ofrecer mucha más información sobre el estado de salud de la batería.

Para el método basado en modelos, por un lado, la capacidad de la batería capacidad o la resistencia interna como parámetros basándose en el modelo de circuito equivalente de la batería y el modelo electro-químico. A continuación, varios ob-

servadores como los filtros de partículas [44], los filtros de Kalman [45] y el modo deslizante, para estimar la capacidad y la resistencia interna durante el funcionamiento de la batería. El rendimiento y la resistencia interna de la batería durante su funcionamiento permiten obtener información sobre su estado de salud SOH. Por otro lado, para analizar los efectos de los factores de estrés en la degradación de la batería, algunos investigadores se enfocan en desarrollar modelos de ciclo de vida de la batería.

Definición de la pérdida de capacidad de la batería C_{loss} como:

$$C_{loss} = (C_n - C_{aged})/C_n \times 100\%. \quad (2.11)$$

Entonces C_{loss} puede expresarse como:

$$C_{loss} = \delta_{func}(f)Ah^z, \quad (2.12)$$

donde f representa los factores de tensión que causan la degradación de la capacidad, Ah significa el rendimiento de corriente acumulado, z es un parámetro de ley de potencia, δ_{func} representa los efectos de los factores de estrés sobre la capacidad degradada de la batería.

2.3. Sistema de tracción

En esta sección se describen en detalle los elementos esenciales del sistema de propulsión eléctrica propuesto en este estudio. En la Figura 2.1 se muestra un diagrama del vehículo eléctrico, el cual se puede subdividir en una parte eléctrica que contiene las baterías y en una parte mecánica.

El motor síncrono desempeña una función crucial tanto en la parte eléctrica como en la mecánica del sistema, ya que se encarga de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. A continuación, se explicará en detalle el funcionamiento de cada uno de los componentes que integran el sistema de propulsión eléctrica.

2.3.1. Motor síncrono

El motor síncrono de imanes permanentes (PMSM), ha sido muy utilizado en el accionamiento de vehículos eléctricos con alta eficiencia, densidad de par y densidad de potencia. La técnica de control vectorial se adopta principalmente para accionar a las PMSM en la actualidad. Un buen rendimiento dinámico y una alta eficiencia son

muy importantes para el accionamiento de los vehículos eléctricos. Con una respuesta de par dinámico y robustez, el control directo de par (DTC), se ha convertido en un controlador vectorial muy competitivo [46, 47], en comparación con el método de control por campo orientado FOC [48].

El DTC se ha introducido en el accionamiento PMSM desde hace más de 20 años, de igual forma que se aplica en los motores de inducción.

Según Xu Jiaqun, realiza un análisis de un pequeño auto de pasajeros accionado por un motor síncrono de imanes permanentes interiores (IPMSM), donde se utilizan 24 baterías de plomo-ácido. Los datos de este vehículo eléctrico se muestran en la Tabla 2.1 [47].

Descripción	Datos
Velocidad	40km/h
Velocidad máxima	70km/h
Graduabilidad	5
Tiempo de aceleración (0~20 km/h)	8,5s
Zona de la cara frontal	2,309m ²
Relación de transmisión	7,21
Radio de la rueda	0,255m

Tabla 2.1: Datos vehículo eléctrico

Una buena respuesta de par dinámico y una baja pérdida de pérdidas de conmutación son muy importantes para el PMSM y su controlador en el accionamiento de vehículos eléctricos.

Las principales ventajas de estas máquinas son su baja inercia y alta eficiencia, densidad de potencia y fiabilidad. Además, los PMSM son ideales para aplicaciones en las que se requiere un control de par rápido y preciso.

El uso de vectores espaciales y transformaciones orientadas a campos se ha desarrollado minuciosamente para aplicaciones que requieren una respuesta dinámica rápida. Las principales limitaciones de estas técnicas se deben a la dependencia de la transformación de los parámetros del modelo de máquina y la necesidad de un sensor de posición del rotor, lo que aumenta el costo del sistema. El uso de DTC en PMSM se propuso a finales de los noventa [49, 50]; desde entonces no ha habido mayores contribuciones para mejorar esta técnica de control. DTC [51] mejora el rendimiento del controlador de la máquina y reduce la influencia de la variación de parámetros durante su funcionamiento, y utiliza una tabla de conmutación de puente inversor que configura la salida del convertidor según los errores de flujo/par y el ángulo de

flujo. El comportamiento bang-bang producido por el número limitado de estados disponibles en el puente inversor (solo siete estados diferentes) produce un par de ondulación eléctrica prominente[50].

2.3.2. Control de par

El algoritmo DTC convencional fue propuesto por Takahashi [51], la cual es una herramienta ampliamente utilizada en los sistemas de control industrial [52].

Este sistema se fundamenta en la medición y regulación directa del par eléctrico instantáneo. Mediante esta configuración, se ha logrado reducir el impacto de la variabilidad de los parámetros de la máquina en el controlador. Esta dificultad había obstaculizado la implementación industrial de controladores de campo orientado en máquinas de inducción, debido a que los parámetros de estas máquinas tendían a cambiar durante la operación [46].

Adicionalmente, este enfoque posibilita un control directo del par y el flujo con una reducida dependencia de los parámetros. Esta técnica se basa en la capacidad de estimar con precisión tanto el par eléctrico como los enlaces de flujo del estátor, mediante la medición exclusiva de corrientes y tensiones en las bobinas del convertidor electromecánico [53].

El diagrama de bloques para el algoritmo DTC clásico se muestra en la figura 2.5.

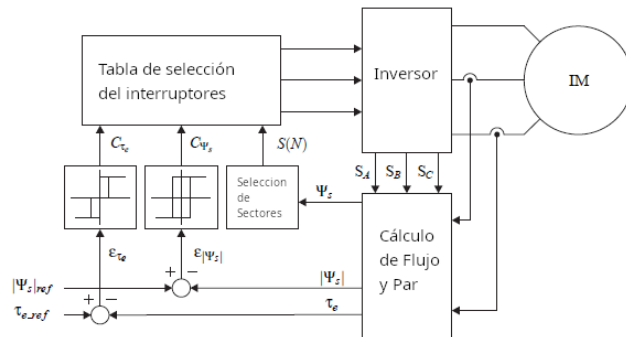


Figura 2.5: Diagrama de bloques para el DTC clásico

El vector espacial de flujo puede ajustarse con la selección adecuada de uno de los siete vectores de tensión del estátor producidos por el puente inversor. El flujo del estátor puede ajustarse aumentando o disminuyendo su magnitud y girar en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario para obtener el par requerido.

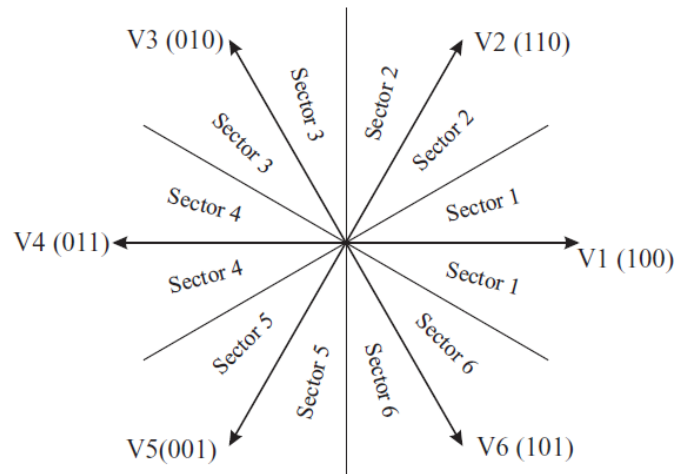


Figura 2.6: Vectores espaciales de tensión en función de la conectividad del inversor

A continuación en la Figura 2.6 se observa los seis estados, estos definen vectores espaciales de tensión de igual magnitud y desfasados $\frac{\pi}{3}$ entre ellos [50].

Mediante una simulación de control directo de par con los siguientes parámetros típicos: $R_e = 0,03; R_r = 0,05; L_e = 2,1; L_r = 2,1; L_{er} = 2,0; J = 100$ podemos observar los resultados en la Figura 2.7 y 2.8

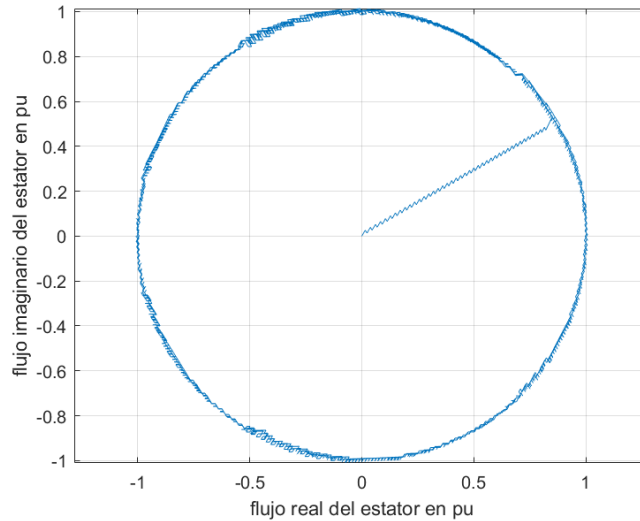


Figura 2.7: Simulación flujo del estator mediante Matlab

La Fig. 2.7 muestra que el flujo se mantiene dentro de la banda de histéresis selec-

cionada, lo que implica ventajas para la máquina porque se minimizan las pérdidas y vibraciones mecánicas.

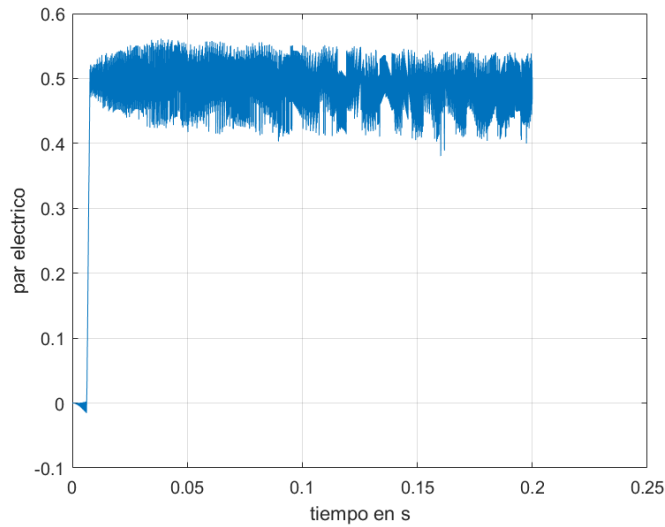


Figura 2.8: Simulación del Par eléctrico mediante Matlab

La Fig. 2.8 muestra que el par tienen el típico rizado presente en los algoritmos DTC.

2.3.2.1. Frenado regenerativo.

Durante la conducción de un vehículo, las ruedas generan una considerable cantidad de energía cinética. Sin embargo, esta energía se disipa en forma de calor y fricción durante el proceso de frenado mecánico, lo que resulta en una pérdida de energía. La técnica de frenado regenerativo es un proceso de extracción de energía en el que esta energía cinética se convierte en energía eléctrica útil y puede ser almacenar en las baterías. La Fig. 2.9, muestra el estado de conducción normal hacia delante en la que el motor realiza tracción en la dirección del movimiento y el par motor actúa en la misma dirección de giro de la rueda.

2 CAPÍTULO 2: Fundamentos Teóricos

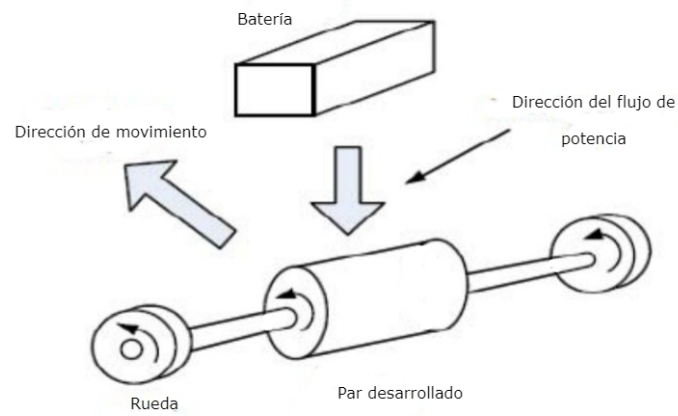


Figura 2.9: Estado de conducción normal

La fuerza electromotriz producida por la máquina se opone al movimiento de los vehículos según la ley de Lenz. En esta situación, el aumento en la fuerza del campo magnético contribuye a mejorar las características de velocidad de los vehículos. Mientras que en la Fig. 2.10, se muestra la regeneración durante el frenado en el cual el motor actúa como generador, por lo que la fuerza electromotriz reduce la velocidad. El par motor actúa en dirección opuesta a la dirección de giro de la rueda. Además, se muestra que la energía se transfiere de vuelta a la batería, mientras que el diagrama de la Fig. 2.9, muestra que la batería está suministrando energía. El frenado regenerativo reduce la dependencia del combustible, aumenta el rendimiento y reduce las emisiones. Este sistema es más eficaz en zonas urbanas con condiciones de conducción de frecuentes aceleraciones y frenados. Además, los tiempos de frenado serán menores a los que se obtienen mediante el frenado convencional utilizando zapatas [4].

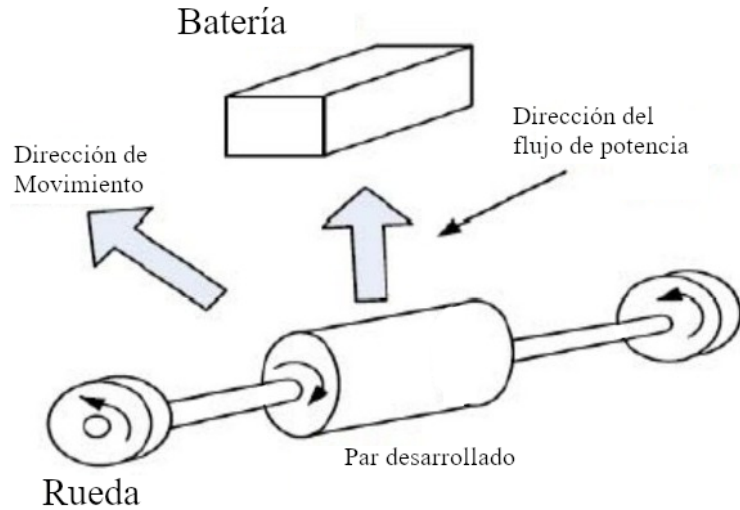


Figura 2.10: Estado de frenado Regenerativo

2.3.2.2. Modelación del sistema de tracción

Para modelar el sistema de tracción es necesario representar la dinámica del vehículo en combinación con la característica par-velocidad del motor. La característica de tracción depende de las pendientes y velocidades a que debe circular el vehículo. Estas pendientes y velocidades se transfieren al motor a través de las ruedas y el sistema de transmisión. La máquina eléctrica posee una característica de tracción modulada mediante el controlador electrónico que se esté utilizando.

En los vehículos eléctricos se sigue utilizando la estrategia de control que se empleaba anteriormente en las máquinas de corriente continua con excitación serie. Estas máquinas eran adecuadas para la tracción de vehículo porque mantenían prácticamente constante la potencia a un rango muy amplio de velocidades.

La tracción en máquinas de corriente continua se establece mediante el control del circuito de armadura y se puede ampliar mediante el ajuste de la corriente de campo:

$$E_a = G\omega_m i_f \quad (2.13)$$

$$V_a = R_a i_a + E_a \quad (2.14)$$

$$T_e = G i_a i_f \quad (2.15)$$

En las máquinas tipo serie la corriente de armadura y campo son iguales. $i_a = i_f$.

2 CAPÍTULO 2: Fundamentos Teóricos

Por tal motivo el par eléctrico se determina a partir de (2.13) a (2.15) como:

$$T_e = G i_a^2 = G \left(\frac{V_a}{R_a + \omega_m G} \right)^2$$

La aceleración deseada, calculada por el bloque de simulación del conductor, puede ser positiva que será la tracción o negativa que será el frenado. Este incremento de velocidad se refleja en una corriente deseada, ya que en el vehículo, generalmente, el acelerador controla la consigna de corriente. La corriente deseada, si es positiva, da origen a la secuencia de cálculo de tracción, como se observa en la figura 2.11 y si es negativa, a la de frenado como se observa en la Figura 2.12.

En la secuencia de tracción, en el caso de que la corriente deseada sea mayor que la máxima posible, se limita la corriente a este valor. Luego se calcula la corriente máxima que es posible tener a la velocidad del vehículo con el voltaje actual de la batería. Este valor se calcula en una secuencia de cálculo que utiliza las características de generación de los motores en forma iterativa hasta conseguir que se cumpla la siguiente expresión:

$$V_{BAT} = R_T I_{arm} + R_{Flujo} (C_{campo} I_{arm}) \omega_m \quad (2.16)$$

Si la corriente máxima para la velocidad *IVELO*, es mayor que la corriente deseada *IDES*, la cual ocurre a bajas velocidades, se utiliza como corriente de armadura la corriente deseada y se calcula con ella el torque, mediante un cálculo previo del flujo que produce esta corriente.

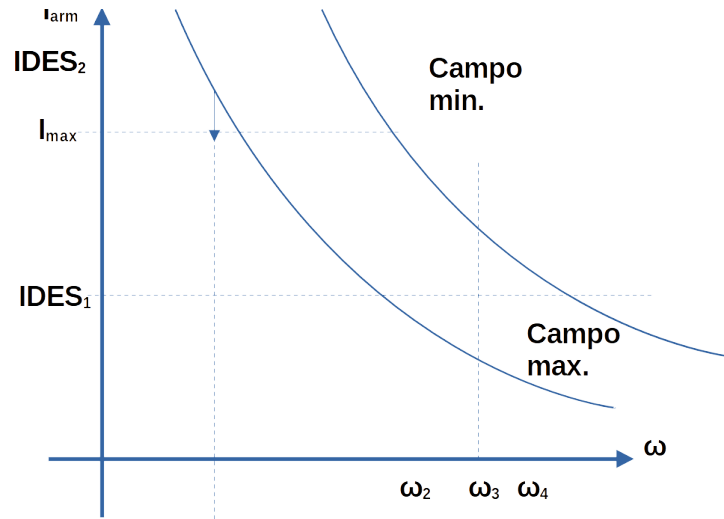


Figura 2.11: Características de tracción

Si $IVELO$ es menor que $IDES$, es necesario calcular si esta corriente se puede conseguir mediante una disminución del campo [54].

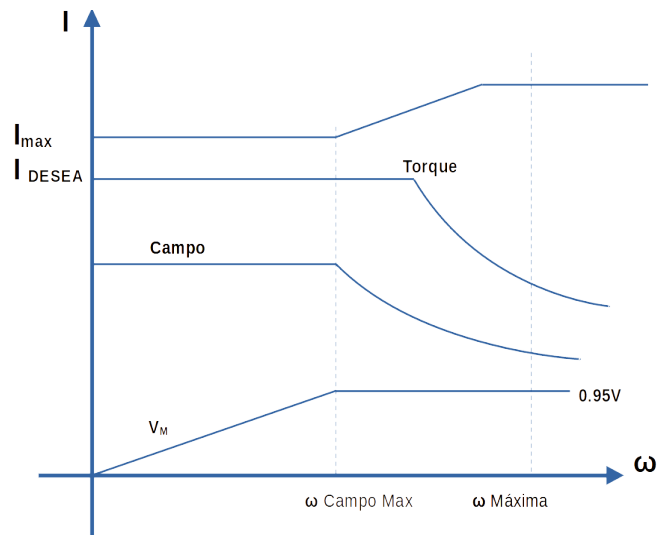


Figura 2.12: Característica de Regeneración

3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

En este capítulo, se obtienen los parámetros del modelo de vehículo con una batería de ion-litio. Para trazar la ruta de conducción se toma en cuenta la trayectorias comprendidas entre la Universidad Politécnica Salesiana y el condominio El Pacifico y viceversa; en la ciudad de Cuenca, la cual permite conocer las exigencias a la cual estará sometida dicha batería.. En el modelamiento de la batería *LiFePO4* se usa el circuito equivalente (ECM) y se selecciona los parámetros iniciales que propone Zhang [55] en su investigación. Mediante Matlab® , el cual modela y simula cada una de las rutas trazadas, se obtiene parámetros necesarios para considerar al momento de modelar la batería.

3.1. Características del vehículo



Para el desarrollo del modelamiento de la batería, se tiene que partir de las características básicas del vehículo que cumplirá con cierta ruta. Se determina que las características serán las presentada en la siguiente Tabla 3.1

Tabla 3.1: Características del vehículo

Datos	Descripción
Peso	700kg
Capacidad	4Pasajeros
Capacidad Total	1000kg
Velocidad	16m/s
Aceleración Inicial	1,6m/s ²
Radio de la Rueda	R12
Tiempo de aceleración de 0-60km/h	10s

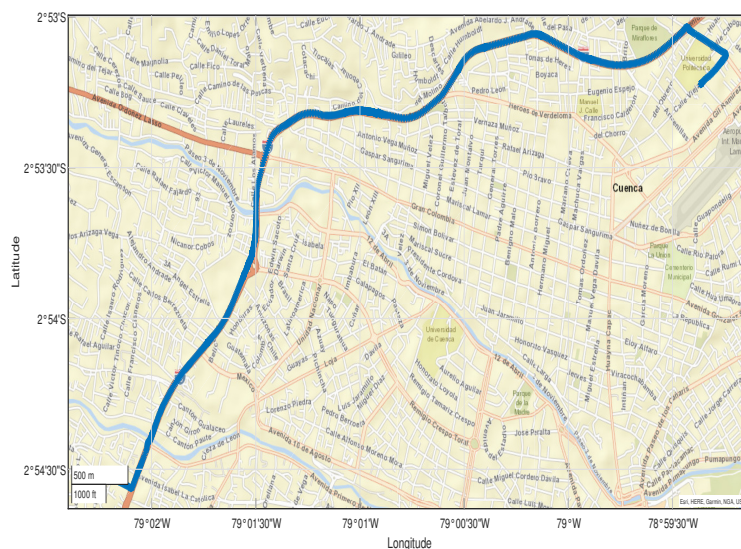


Figura 3.1: Trazado de ruta

3.2. Trazado de ruta

En la Figura 3.1 se tiene la ruta sugerida para el desarrollo del análisis, tomando como punto de partida la Universidad Politécnica Salesiana y como llegada el condominio El Pacifico en la calle Cornelio Crespo Vega y Tarquino Cordero.

Se obtiene una ruta con una distancia de 7,65km, el análisis esta enfocado en conocer la pendiente máxima y mínima en dicha ruta tanto en ida como regreso.

3.2.1. Análisis de ruta

Para el análisis de la ruta se calculan ciertos parámetros en cada punto del trayecto como:

Resistencia-aerodinámica

3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

La resistencia aerodinámica se trata de la fuerza que se opone al movimiento de un elemento mientras se desplaza a través del aire. Para calcular esta fuerza es necesario considerar varios factores que se reflejan mediante la siguiente expresión 3.1.

$$R = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times C_d \times v^2, \quad (3.1)$$

donde:

ρ representa la densidad del aire, cuyo valor es $1,25\text{kg}/\text{m}^3$.

A se refiere al área frontal del auto que es igual a 4m^2 .

C_d es el coeficiente de arrastre que es igual a 0,3.

v es la velocidad del auto.

Potencia

Para determinar la potencia que esta relacionada con las distintas fuerzas y energías que intervienen en el ascenso de un auto por una pendiente, se obtiene mediante la siguiente expresión 3.2.

$$P = (p \times \sin(\theta) + \mu \times p \times \cos(\theta) + R + m + a) \times v, \quad (3.2)$$

donde:

p es el peso del auto debido a la gravedad.

μ es el coeficiente de fricción que es igual a 0,02.

θ es el ángulo de inclinación o porcentaje de la pendiente.

R es la resistencia aerodinámica.

m es la masa del auto.

a es la aceleración del auto .

v es la velocidad del auto.

Aceleración

3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

Para realizar el cálculo de la aceleración se aplica la expresión 3.3.

$$a = \frac{(v_f)^2 - (v_0)^2}{2 \times \Delta d}, \quad (3.3)$$

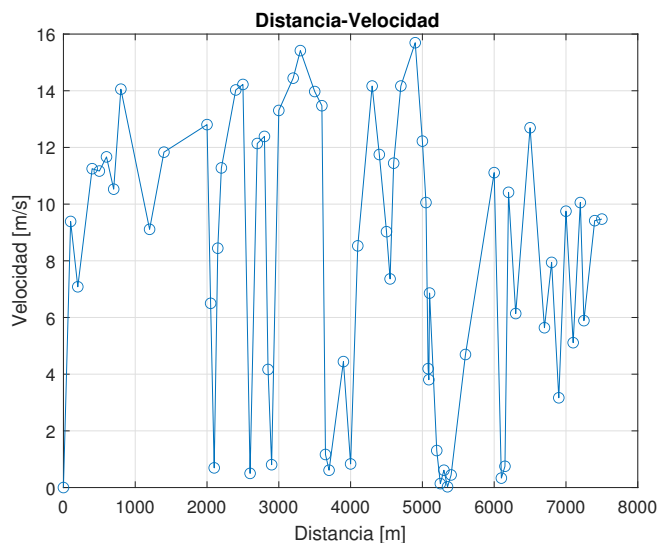
donde:

v_f es la la velocidad final.

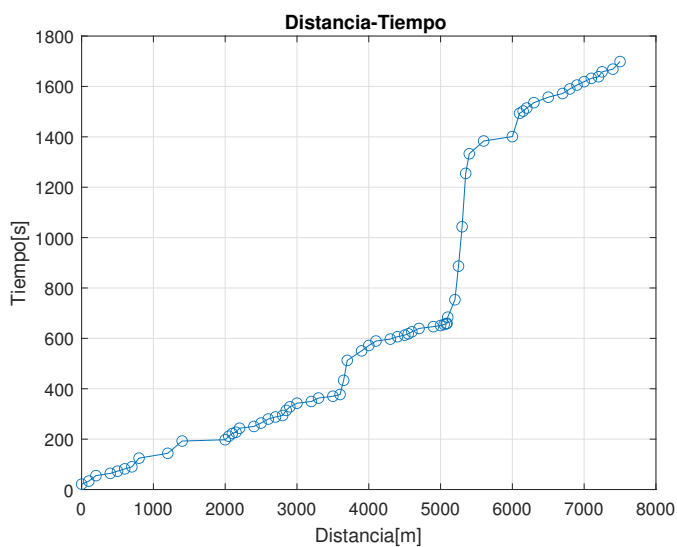
v_0 es la velocidad inicial.

Δd es el delta distancia.

Ruta: Universidad Politécnica Salesiana - Condominio El Pacifico Con los parámetros obtenidos en la trayectoria de la ruta anteriormente descrita, en la Fig. 3.2, se muestran las gráficas de Velocidad-Distancia y Tiempo-Distancia con sus respectivos valores según la trayectoria recorrida.



(a) Parámetros velocidad-distancia de la ruta



(b) Parámetros tiempo-distancia de la ruta

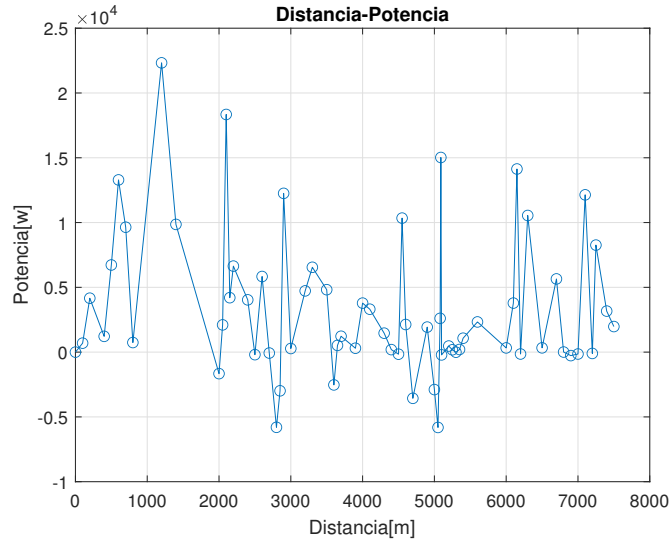
Figura 3.2: Gráfica de Velocidad y Tiempo durante la ruta UPS - Condominio El Pacifico

La Fig. 3.2a, muestra las distintas velocidades en $[m/s]$ durante la trayectoria, donde se refleja que la velocidad máxima a la que va el automóvil es de $16,6m/s$ según los requerimientos iniciales. La Fig. 3.2b, muestra el instante de tiempo en $[s]$ cuando el vehículo esta en cierta posición de la trayectoria, a su vez refleja que la

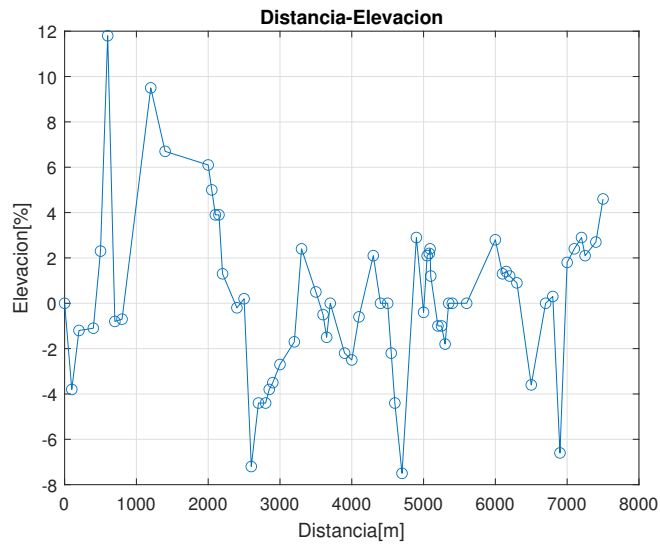
3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

distancia recorrida es de 7650m.

A continuación ,en la Fig. 3.3, se muestran las gráficas de Potencia-Distancia y Elevación-Distancia con sus respectivos valores según la trayectoria recorrida.



(a) Parámetros potencia-distancia de la ruta



(b) Parámetros elevación-distancia de la ruta

Figura 3.3: Gráfica de Potencia y Elevación durante la ruta UPS - Condominio El Pacifico

3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

La Fig. 3.3a, muestra las distintas potencias en $[w]$ durante la trayectoria, donde se refleja que las potencias máximas y mínimas a la que va el automóvil. La Fig. 3.3b, muestra el porcentaje de elevación de las distintas pendientes a las que se sometió el vehículo en la trayectoria, a su vez refleja que la pendiente máxima es de 11,8.

Finalmente para conocer cuanta energía se consumió, en la Fig. 3.4, se muestra la gráfica de Potencia-Tiempo con sus respectivos valores según la trayectoria recorrida.

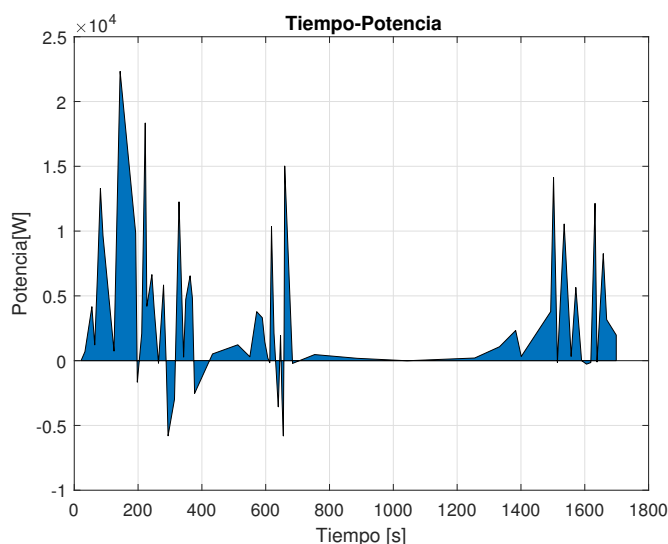


Figura 3.4: Gráfica Potencia-Tiempo durante la ruta UPS - Condominio El Pacifico

La Fig. 3.4, muestra las distintas potencias en $[w]$ en base al tiempo recorrido durante la trayectoria, al realizar la integración del área situada debajo de la curva, se obtuvo información acerca de la energía consumida durante la ruta es $3747702,995333J$.

A continuación, para iniciar con una base sólida de los cálculos y posterior presentación de resultados, se analiza datos del automóvil eléctrico en la ruta específica. Estos datos son cruciales para entender cómo la ruta afecta el rendimiento del automóvil eléctrico.

- Pendiente máxima entre el km 0.5 - km 0.6

$$Pendiente_{max} = 11,8$$

- Consumo

$$p = 16,6 \text{ m/s} \times 0,118 \% \times 1000 \text{ kg} \times 10 \text{ seg}$$

3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

Entonces se tiene una potencia de consumo de:

$$p = 19,588kW$$

- Fuerza de aceleración

$$F_a = m \times a = 1000kg \times 1,6m/s^2 = 1600N$$

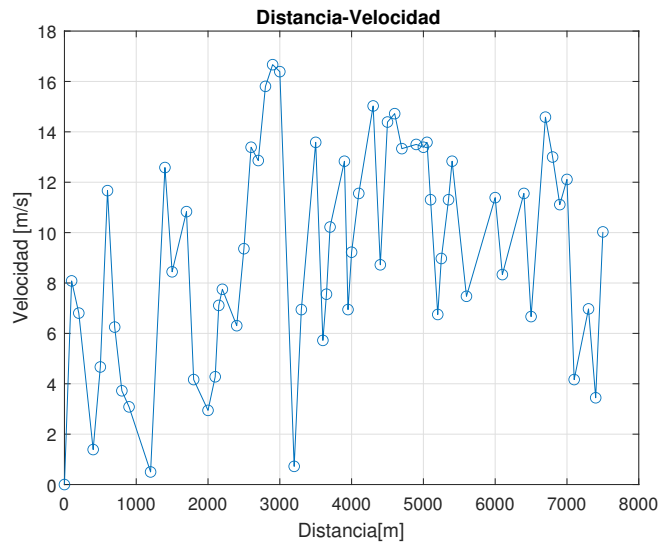
- Potencia

$$p = F_a \times v = 1600N \times 16,6m/s = 26kW$$

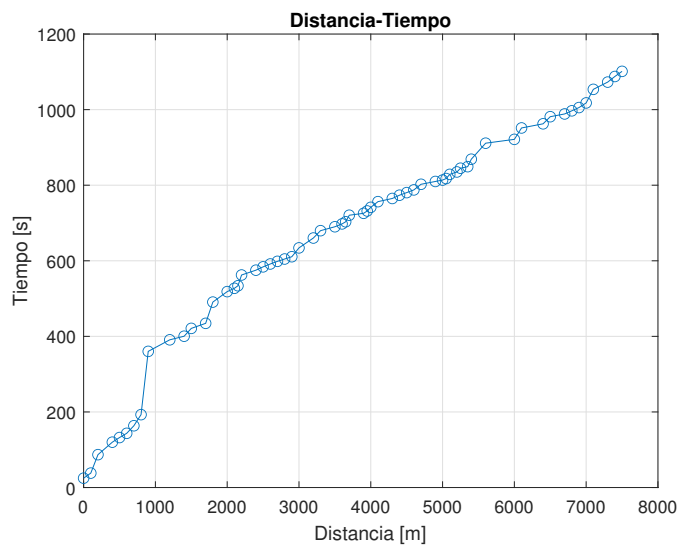
- Potencia total

$$P_T = 26kw + 20kW = 46kW$$

Ruta: Condominio El Pacifico -Universidad Politécnica Salesiana Con los parámetros obtenidos en la trayectoria de la ruta anteriormente descrita, en la Fig. 3.5, se muestran las gráficas de Velocidad-Distancia y Tiempo-Distancia con sus respectivos valores según la trayectoria recorrida.



(a) Parámetros velocidad-distancia de la ruta



(b) Parámetros tiempo-distancia de la ruta

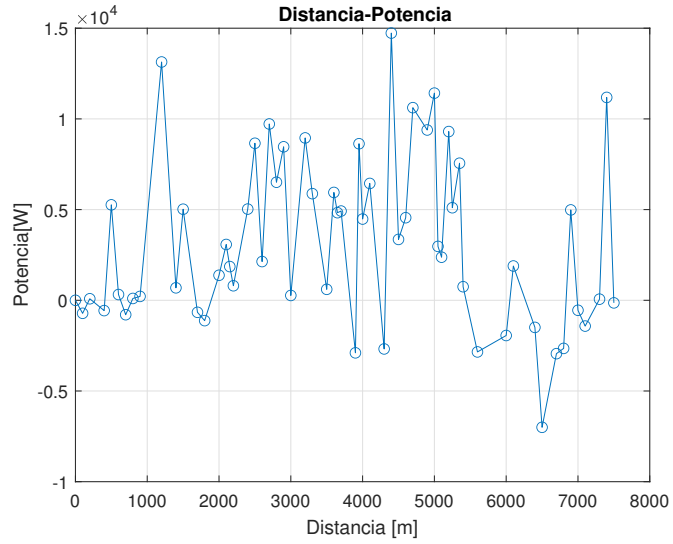
Figura 3.5: Gráfica de Velocidad y Tiempo durante la ruta Condominio El Pacifico - UPS

La Fig. 3.5a, muestra las distintas velocidades en $[m/s]$ durante la trayectoria, donde se refleja que la velocidad máxima a la que va el automóvil es de $16,6m/s$ según los requerimientos iniciales. La Fig. 3.5b, muestra el instante de tiempo en $[s]$ cuando el vehículo esta en cierta posición de la trayectoria, a su vez refleja que la

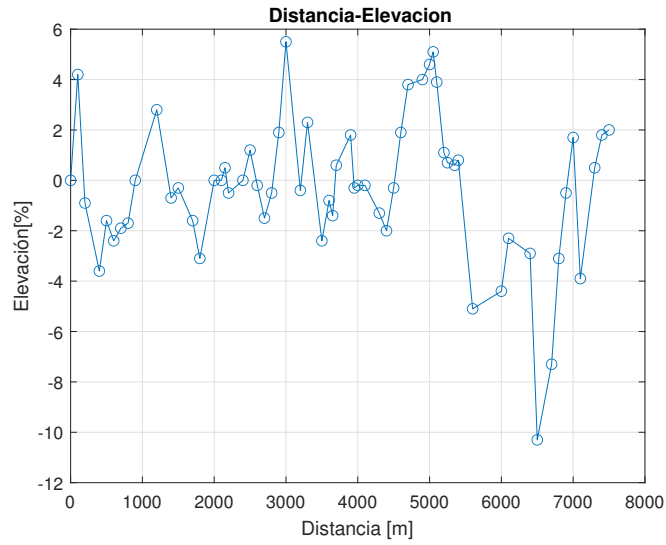
3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

distancia recorrida es de 7650m.

A continuación, en la Fig. 3.6, se muestran las gráficas de Potencia-Distancia y Elevación-Distancia con sus respectivos valores según la trayectoria recorrida.



(a) Parámetros potencia-distancia de la ruta



(b) Parámetros elevación-distancia de la ruta

Figura 3.6: Gráfica de Potencia y Elevación durante la ruta Condominio El Pacifico - UPS

3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

La Fig. 3.6a, muestra las distintas potencias en $[w]$ durante la trayectoria, donde se refleja que las potencias máximas y mínimas a la que va el automóvil. La Fig. 3.6b, muestra el porcentaje de elevación de las distintas pendientes a las que se sometió el vehículo en la trayectoria, a su vez refleja que la pendiente máxima es de 5,5.

Finalmente para conocer cuanto energía se consumió, en la Fig. 3.7, se muestra la gráfica de Potencia-Tiempo con sus respectivos valores según la trayectoria recorrida.

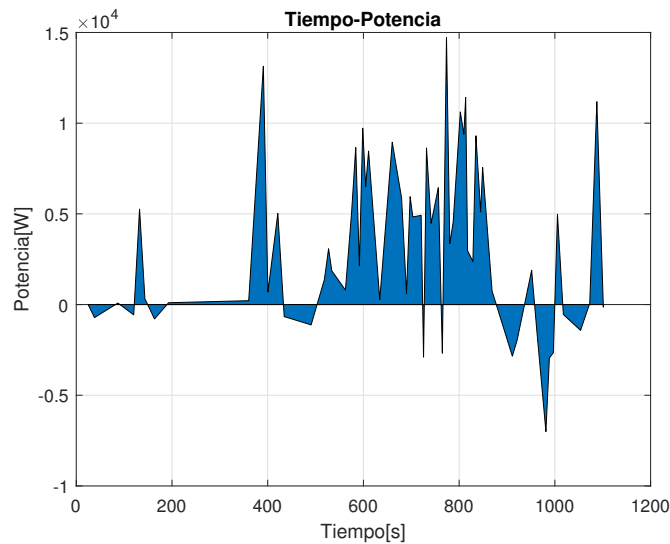


Figura 3.7: Gráfica de Potencia-Tiempo durante la ruta Condominio El Pacifico - UPS

La Fig. 3.7, muestra las distintas potencias en $[w]$ en base al tiempo recorrido durante la trayectoria, al realizar la integración del área situada debajo de la curva, se obtuvo información acerca de la energía consumida durante la ruta es $2011594,048798J$.

A continuación, para iniciar con una base sólida de los cálculos y posterior presentación de resultados, se analiza datos del automóvil eléctrico en la ruta específica. Estos datos son cruciales para entender cómo la ruta afecta el rendimiento del automóvil eléctrico.

- Pendiente máxima entre el km 2.8 – km 3

$$Pendiente_{max} = 5,5\%$$

- Consumo

$$p = 16,6 \text{ m/s} \times 0,055\% \times 1000\text{kg} \times 10\text{seg}$$

Entonces se tiene una potencia de consumo de:

$$p = 9,13kW$$

- Fuerza de aceleración

$$F_a = m \times a = 1000kg \times 1,6m/s^2 = 1600N$$

- Potencia

$$p = F_a \times v = 1600N \times 16,6m/s = 26kw$$

- Potencia total

$$P_T = 26kw + 9,13kw = 35,13kW$$

3.3. Selección del modelo de circuito equivalente

Zhang [55], propone un nuevo método de identificación de parámetros para el modelo de circuito equivalente (ECM) de batería de ión-litio, tomando en consideración las propiedades electro-químicas. Se establece un modelo mejorado de (P2D) mejorado, basado en ecuaciones diferenciales parciales (EDP).

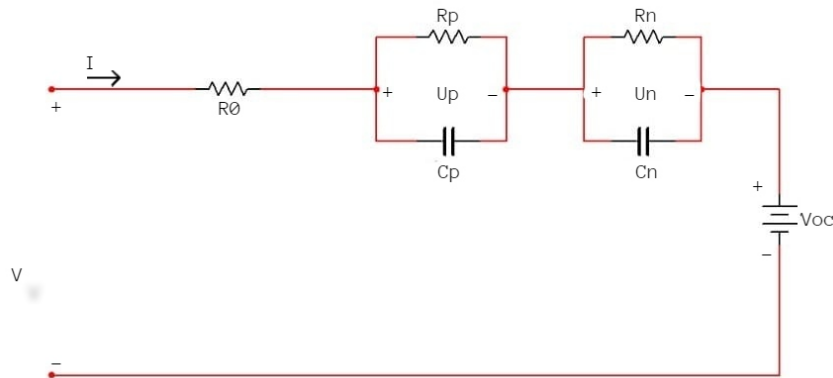


Figura 3.8: Esquema del modelo de circuito equivalente

Para garantizar la compatibilidad entre el esquema del modelo de circuito equivalente y el modelo electro-químico, se elige un modelo de Thevenin de 2^o orden como se muestra en en la Fig. 3.8.

3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

El esquema del modelo de Polarización Dual o Doble Polarización consiste en una fuente de voltaje que representa la tensión de circuito abierto, junto con resistencias internas como R_0 , que representa la resistencia óhmica del acumulador. También se incluyen las resistencias de polarización R_p y R_n , que representan respectivamente la resistencia efectiva asociada a la polarización de activación y la polarización de concentración. Además, se utilizan los condensadores C_p y C_n en el modelo, los cuales cumplen la función de representar la respuesta transitoria durante la transferencia de potencia, así como describir individualmente la polarización de activación y la polarización de concentración.

Tabla 3.2: Parámetros ECM

Parámetro	R_0	R_p	C_p	R_n	C_n	V_{celda}	Q_{celda}
Valor	$3,8m\Omega$	$4m\Omega$	$4434F$	$1,9m\Omega$	$2820F$	$3,2V$	$20Ah$

Los parámetros iniciales del esquema del modelo de circuito equivalente de la batería $LiFePO_4$ se reflejan en la Tabla 3.2, los cuales serán la base para dimensionar la batería del auto eléctrico.

3.3.1. Dimensionamiento de parámetros iniciales de la batería

Como datos de entrada tenemos los obtenidos en la ruta entre la Universidad Politécnica Salesiana y el condominio El Pacifico, considerando ida y regreso.

- La distancia total recorrida es de $15300m$.
- El tiempo transcurrido en la ruta es de $2799,97sg$.
- La potencia pico observada en los trayectos es de $22325,55W$
- La energía consumida al calcular la integral del área bajo la curva correspondiente a la trayectoria de ida y vuelta, se obtiene un valor de $5926941,31J$
- Resulta relevante considerar las disipaciones de energía que tienen lugar durante la transmisión y el procesamiento de la misma, por tal motivo se multiplica la energía consumida por un factor de seguridad de 1.4:

$$EnergiaFinal_{consumida} = 8297700,00J$$

A continuación se calculan los parámetros de la batería de ion-litio usando los datos iniciales que se reflejan en la Tabla 3.2 .

3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

- El Voltaje nominal del banco de batería es $300V$.

- La Energía en una celda se calcula de la siguiente manera:

$$Energia_{celda} = voltaje_{celda} \times Q_{celda} \times 3600 = 3,2 \times 20 \times 3600 = 230400J$$

- La capacidad de la batería en amperios-hora se determina a continuación:

$$Capacidad_{bateria} = \frac{EnergiaFinal_{consumida}}{voltaje_{banco} \times 3600} = 7,6831Ah$$

- El cálculo de la capacitancia de la batería se lleva a cabo utilizando el siguiente procedimiento:

$$C = \frac{2Energia_{celda}}{(voltaje_{celda})^2} = 45000F$$

- Los carga se determina a continuación:

$$carga = \frac{C}{voltaje_{celda}} = 45000C$$

- Para calcular la potencia de la batería se realiza de la siguiente manera:

$$potencia_{bateria} = \frac{EnergiaFinal_{consumida}}{Tiempo_{recorrido}} = 2963,5W$$

- Para calcular el numero de celdas en serie de la batería se determina de la siguiente forma:

$$celdas_{serie} = \frac{voltaje_{banco}}{voltaje_{celda}} = 94$$

- Mediante el calculo anterior se puede determinar el voltaje de las celdas en serie:

$$V_{celdas_{serie}} = \frac{celdas_{serie}}{voltaje_{celda}} = 300,8V$$

- Para determinar la corriente máxima que puede suministrar el banco de baterías:

$$Imax_{bateria} = \frac{P_{pico}}{V_{celdas_{serie}}} = 74,226A$$

- Para establecer el numero de celdas en paralelo de la batería se determina de la siguiente forma:

3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

$$celdas_{paralelo} = \frac{I_{max_{bateria}}}{Q_{celda}} = 4$$

- A su vez esto permite determinar el número de elementos de la batería:

$$elementos_{bateria} = celdas_{serie} \times celdas_{paralelo} = 376$$

- La energía de la batería, se determina mediante:

$$E_{bateria} = \frac{1}{2} \times celdas_{serie} \times celdas_{paralelo} \times Q_{celda} \cdots \\ \cdots \times voltaje_{celda} \times 3600 = 43315200J$$

- Para obtener el voltaje de circuito abierto, calculamos:

$$VOC = celdas_{serie} \times voltaje_{celda} = 300,8V$$

- La capacidad nominal de la batería se determina mediante el siguiente cálculo:

$$Q = \frac{2E_{bateria}}{V_{banco}} = 288768Ah$$

- Si se realiza el producto de la capacidad nominal de la batería por un factor de 1.1, se obtiene la capacidad máxima de la batería, que proporciona un margen de seguridad del 10 % para el sistema.

$$Q_{max} = 317640Ah$$

3.3.2. Adquisición de los componentes del modelo

Al examinar el modelo de Thevenin de 2º orden de la Fig. 3.8, se determinaran las siguientes ecuaciones para determinar parámetros de la batería.

Para determinar la variable de estado V_1 se obtiene mediante la siguiente expresión 3.4.

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{C_1} \times I - \frac{V_1}{C_1 \times R_1}, \quad (3.4)$$

donde:

C_1 es el capacitor.

R_1 es la resistencia.

3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

I es la corriente en ese instante de tiempo.

V_1 es el voltaje en ese instante de tiempo.

Para determinar la variable de estado V_2 se obtiene mediante la siguiente expresión 3.5.

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{1}{C_2} \times I - \frac{V_2}{C_2 \times R_2}, \quad (3.5)$$

donde:

C_2 es el capacitor.

R_2 es la resistencia.

I es la corriente en ese instante de tiempo.

V_2 es el voltaje en ese instante de tiempo.

Al integrar la ecuación diferencial 3.4 obtenemos $V_1(t)$ en ese instante de tiempo, llegando a la siguiente expresión 3.6.

$$V_1(t) = V_{1_{t-1}} + \left(\frac{1}{C_1} \times I - \frac{V_1}{C_1 \times R_1} \right) \times \Delta t, \quad (3.6)$$

donde:

C_1 es el capacitor.

R_1 es la resistencia.

I es la corriente en ese instante de tiempo.

V_1 es el voltaje en ese instante de tiempo.

Δt es el delta tiempo.

$V_{1_{t-1}}$ es el voltaje en el instante de tiempo anterior.

Al integrar la ecuación diferencial 3.5 obtenemos $V_2(t)$ en ese instante de tiempo, llegando a la siguiente expresión 3.7.

$$V_2(t) = V_{2_{t-1}} + \left(\frac{1}{C_2} \times I - \frac{V_2}{C_2 \times R_2} \right) \times \Delta t, \quad (3.7)$$

donde:

3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

- C_2 es el capacitor.
 R_2 es la resistencia.
 I es la corriente en ese instante de tiempo.
 V_2 es el voltaje en ese instante de tiempo.
 Δt es el delta tiempo.
 $V_{2_{t-1}}$ es el voltaje en el instante de tiempo anterior.

Para encontrar el voltaje de salida $V(i)$ se aplica la expresión 3.8:

$$V = V_{OC} - R_0 \times I - V_1 - V_2, \quad (3.8)$$

donde:

- R_0 representa la resistencia interna.
 V_{OC} denota el voltaje de circuito abierto.
 I representa la corriente en ese momento específico.
 V_1 es el voltaje V_1 en ese instante de tiempo.
 V_2 es el voltaje V_2 en ese instante de tiempo.

Para poder hacer que el vehículo vaya a cierta velocidad se requiere una cierta energía del motor eléctrico. Lo que se debe hacer es aplicar la expresión para calcular la corriente eléctrica 3.9.

$$I = \frac{V_{OC} - V_1 - V_2 - \sqrt{V_{OC} - V_1 - V_2 - 4 \times R_0 \times P}}{2R_0}, \quad (3.9)$$

donde:

- R_0 es la resistencia interna.
 V_{OC} es el voltaje de circuito abierto.
 I es la corriente en ese instante de tiempo.
 P es la potencia en ese instante de tiempo.
 V_1 es el voltaje V_1 en ese instante de tiempo.
 V_2 es el voltaje V_2 en ese instante de tiempo.

3.3.3. Determinación del SOC

El nivel de carga de una batería de iones de litio en un momento dado, conocido como Estado de Carga *SOC*, representa la cantidad de energía eléctrica disponible y se expresa como un porcentaje de la capacidad total de la batería. En el contexto de los vehículos eléctricos, el *SOC* es un indicador crucial de la autonomía, ya que refleja cuánta energía queda para alimentar el motor y cuánta distancia adicional puede recorrer el vehículo antes de que la batería se agote.

El algoritmo utilizado para estimar el *SOC* se basa en la integración de *amperios-hora*. Esta técnica, debido a su algoritmo de cálculo sencillo, ha sido ampliamente aceptada en la estimación del *SOC* de diversas tecnologías de acumuladores de energía, incluyendo la tecnología de iones de litio.

Para realizar el cálculo de el *SOC*, el cual se expresa como un porcentaje, donde 0 % indica una batería descargada y 100 % indica una batería completamente cargada, se aplica la expresión 3.10.

$$SOC = SOC_0 - \frac{\Delta t}{Q} \times \frac{I}{Ciclos_{carga}}, \quad (3.10)$$

donde:

SOC_0 es el valor inicial del estado de carga.

Δt es el delta tiempo transcurrido desde el último cálculo, expresado en segundos.

I es la corriente actual de la batería.

Q es la es la capacidad nominal de la batería, expresada en amperios-hora.

$Ciclos_{carga}$ es el número de ciclos de carga acumulados en ese instante.

En el análisis se comprueba si el estado de carga ha caído por debajo del 10 % . Si es así, asume que la batería necesita ser cargada y establece el estado de carga inicial en 100 % multiplicado por el estado de salud de la batería del cálculo anterior.

3.3.4. Cálculo del estado de salud (SOH)

El estado de salud de una batería de litio en un automóvil eléctrico indica el estado de la batería entre el inicio de la vida y el final de la vida en porcentajes, se refiere a su capacidad de almacenar y suministrar energía en comparación con su capacidad nominal original. A medida que pasa el tiempo, la salud de la batería puede

deteriorarse debido a diversos factores, como la edad, la temperatura y el número de ciclos de carga y descarga. Esta degradación puede disminuir la capacidad de la batería para suministrar la energía requerida para el funcionamiento del vehículo, lo que a su vez puede impactar su rendimiento y autonomía.

Por lo tanto, es importante monitorear y mantener el estado de salud de la batería de litio en los automóviles eléctricos para garantizar su rendimiento óptimo y prolongar su vida útil.

Para realizar el cálculo de el *SOH*, se aplica la expresión 3.11.

$$SOH = \exp\left(-\frac{Ciclos_{carga} \times k}{(Q_{max})^k}\right), \quad (3.11)$$

donde:

k es la constante de envejecimiento de la batería.

Q_{max} es la capacidad nominal máxima de la batería.

$Ciclos_{carga}$ es el número de ciclos de carga y descarga que ha experimentado la batería.

Si el estado de salud ha caído por debajo del 90 %, se asume que la batería necesita ser reemplazada.

3.3.5. Proceso de carga y descarga

Las baterías de iones de litio son diseñadas para ser recargables, lo que implica que atraviesan ciclos de carga y descarga. Estos ciclos consisten en cargar la batería y luego descargarla para su uso. En general, cuanto más ciclos de carga y descarga tenga una batería, menor será su capacidad total.

El inicio del ciclo de carga ocurre cuando se establece la conexión entre una batería y una fuente de carga, tal como un cargador de batería. Durante la carga, la corriente fluye desde el cargador a la batería, esto da lugar al desplazamiento de los iones de litio desde el cátodo hacia el ánodo. Una vez que la batería alcanza su carga completa, la corriente se detiene y la batería está lista para su uso.

El ciclo de descarga se inicia cuando se emplea la batería para suministrar energía a un dispositivo. Durante este proceso, los iones de litio se desplazan del ánodo hacia el cátodo, generando una corriente eléctrica que alimenta el dispositivo. A medida que la batería se descarga, su voltaje disminuye, indicando su nivel de agotamiento.

3 CAPÍTULO 3: Modelo del vehículo y trazado de ruta

Con el propósito de evaluar la cantidad de ciclos que una batería de iones de litio puede soportar a lo largo de su vida útil se ha decidido implementar en la simulación la reiteración de las ruta de la Fig. 3.1, dado que este proceso provocará varios ciclos de carga y descarga en la batería.

4 CAPÍTULO 4: Simulaciones y Análisis de Resultados

En este capítulo se llevan a cabo las simulaciones y se realiza el análisis de los resultados obtenidos en la modelación de una batería de ión-litio para que cumpla con las características del vehículo eléctrico. Se analizan pruebas con y sin frenado regenerativo. Para la ruta de conducción se analizan los datos obtenidos considerando la trayectoria tanto de ida como regreso, según las exigencias a la cual estará sometida dicha batería. El entorno de simulación utilizado es Matlab[®], el cual modela y simula cada uno de los parámetros que se desea conocer y analizar mediante gráficas en base al modelación de una batería de ion-litio en un auto eléctrico. Las simulaciones se realizan con distintos ciclos de carga/descarga para la trayectoria trazada, donde permite llevar un control de carga y descarga y determinar su estado de salud de la batería *SOH* a lo largo de su vida útil.

4.1. Datos obtenidos en la ruta de conducción

Tabla 4.1: Parámetros Ruta Universidad Politécnica Salesiana - Condominio El Pacífico - Parte A

Posición] [m]	Δ Tiempo [s]	Elevación %	Velocidad [m/s]	Potencia [kW]	Aceleración [m/s]	Resistencia Aerodinámica
0	21,30	0,00	0	0,00	0,44	0,00
100	33,44	-3,80	9,39	692,60	-0,19	66,11
200	55,26	-1,20	7,08	4162,52	0,19	37,63
400	64,18	-1,10	11,25	1217,03	-0,01	94,92
500	72,94	2,30	11,17	6725,26	0,06	93,52
600	81,95	11,80	11,67	13291,11	-0,13	102,08
700	90,08	-0,80	10,53	9640,31	0,43	83,13
800	124,62	-0,70	14,06	739,86	-0,14	148,17
1200	143,72	9,50	9,11	22325,55	0,14	62,26
1400	192,42	6,70	11,83	9856,67	0,02	105,02
2000	197,60	6,10	12,80	-1660,89	-1,22	122,99
2050	211,50	5,00	6,50	2101,82	-0,42	31,69
2100	222,44	3,90	0,69	18342,16	0,71	0,36
2150	227,51	3,90	8,44	4200,95	0,56	53,48
2200	243,32	1,30	11,28	6639,16	0,17	95,39
2400	250,40	-0,20	14,02	4033,96	0,03	147,58
2500	263,98	0,20	14,22	-196,35	-1,01	151,70
2600	279,81	-7,20	0,5	5836,40	0,74	0,19
2700	287,96	-4,40	12,14	-70,74	0,03	110,51
2800	294,00	-4,40	12,39	-5802,98	-1,36	115,11
2850	314,11	-3,80	4,167	-2985,78	-0,17	13,02
2900	328,29	-3,50	0,80	12253,85	0,88	0,49
3000	342,70	-2,70	13,30	278,21	0,08	132,78
3200	349,40	-1,70	14,44	4726,65	0,15	156,48
3300	363,01	2,40	15,41	6547,96	-0,11	178,26
3500	370,30	0,50	13,97	4818,88	-0,07	146,42
3600	377,13	-0,50	13,47	-2530,21	-1,80	136,13
3650	433,38	-1,50	1,16	518,96	-0,01	1,02
3700	512,50	0,00	0,61	1224,65	0,05	0,28
3900	550,39	-2,20	4,44	300,39	-0,10	14,81
4000	571,76	-2,50	0,83	3782,21	0,36	0,52
4100	589,38	-0,60	8,52	3312,53	0,32	54,54
4300	597,10	2,10	14,16	1463,69	-0,31	150,52
4400	606,73	0,00	11,75	193,85	-0,28	103,55
4500	612,83	0,00	9,02	-159,54	-0,27	61,13
4550	618,14	-2,20	7,36	10343,13	0,77	40,64
4600	625,95	-4,40	11,44	2130,98	0,35	98,23

4 CAPÍTULO 4: Simulaciones y Análisis de Resultados

Tabla 4.2: Parámetros Ruta Universidad Politécnica Salesiana - Condominio El Pacifico - Parte B

Posición] [m]	Δ Tiempo [s]	Elevación %	Velocidad [m/s]	Potencia [kW]	Aceleración [m/s]	Resistencia Aerodinámica
4700	639,35	-7,5	14,17	-3565,26	0,11	150,52
4900	646,51	2,9	15,69	1931,84	-0,48	184,74
5000	651,00	-0,4	12,22	-2890,75	-0,48	112,04
5050	655,21	2,1	10,05	-5814,23	-1,39	75,84
5080	657,71	2,2	4,19	2606,08	-0,16	13,20
5090	659,59	2,4	3,80	15022,38	1,63	10,86
5100	684,08	1,2	6,86	-214,13	-0,23	35,31
5200	753,31	-1	1,30	469,90	-0,02	1,28
5250	886,64	-1	0,13	180,71	0,00	0,01
5300	1043,16	-1,8	0,61	-7,18	0,00	0,28
5350	1254,93	0	0,02	203,67	0,00	0,00
5400	1332,77	0	0,44	1073,50	0,05	0,15
5600	1383,38	0	4,69	2329,36	0,13	16,53
6000	1400,86	2,8	11,11	324,66	-0,62	92,59
6100	1493,16	1,3	0,33	3784,65	0,00	0,08
6150	1502,12	1,4	0,75	14133,83	1,08	0,42
6200	1514,20	1,2	10,41	-145,27	-0,35	81,38
6300	1535,44	0,9	6,13	10546,59	0,31	28,26
6500	1557,26	-3,6	12,69	329,57	-0,32	120,86
6700	1571,98	0	5,63	5649,50	0,16	23,85
6800	1589,98	0,3	7,94	6,49	-0,27	47,34
6900	1605,47	-6,6	3,17	-269,09	0,43	7,52
7000	1618,92	1,8	9,75	-146,25	-0,34	71,30
7100	1632,11	2,4	5,11	12139,19	0,37	19,59
7200	1638,38	2,9	10,05	-101,95	-0,66	75,84
7250	1657,98	2,1	5,88	8260,61	0,18	26,01
7400	1668,57	2,7	9,41	3166,72	0,01	66,51
7500	1698,70	4,6	9,47	1973,56	-0,19	67,29

RUTA: Universidad Politécnica Salesiana - Condominio El Pacifico Los datos obtenidos para el análisis en la trayectoria Universidad Politécnica Salesiana - Condominio El Pacifico se reflejan en la Tabla 4.1 y 4.2.

4 CAPÍTULO 4: Simulaciones y Análisis de Resultados

Tabla 4.3: Parámetros Ruta Condominio El Pacifico - Universidad Politécnica Salesiana - Parte A

Posición] [m]	Δ Tiempo [s]	Elevación %	Velocidad [m/s]	Potencia [kW]	Aceleración [m/s]	Resistencia Aerodinámica
0	24,74	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00
100	38,18	4,20	8,08	-717,87	-0,10	49,01
200	86,99	-0,90	6,81	84,46	-0,11	34,74
400	120,02	-3,60	1,39	-567,90	0,10	1,45
500	132,26	-1,60	4,67	5261,69	0,57	16,33
600	143,42	-2,40	11,67	316,83	-0,49	102,08
700	163,48	-1,90	6,25	-794,67	-0,13	29,30
800	192,87	-1,70	3,72	101,34	-0,02	10,39
900	360,31	0,00	3,08	214,00	-0,02	7,13
1200	390,88	2,80	0,50	13137,07	0,40	0,19
1400	400,39	-0,70	12,58	687,30	-0,44	118,76
1500	421,14	-0,30	8,44	5021,41	0,12	53,48
1700	434,48	-1,60	10,83	-662,68	-0,50	88,02
1800	490,73	-3,10	4,17	-1121,26	-0,02	13,02
2000	518,42	0,00	2,94	1379,68	0,05	6,50
2100	527,20	0,00	4,28	3077,30	0,32	13,72
2150	533,93	0,50	7,11	1859,09	0,09	37,93
2200	562,39	-0,50	7,75	801,48	-0,05	45,05
2400	575,15	0,00	6,31	5028,60	0,24	29,82
2500	583,94	1,20	9,36	8657,12	0,46	65,72
2600	591,56	-0,20	13,39	2135,51	-0,07	134,45
2700	598,54	-1,50	12,86	9720,40	0,42	124,06
2800	604,70	-0,50	15,81	6508,73	0,14	187,36
2900	610,75	1,90	16,67	8462,11	-0,05	208,33
3000	634,13	5,50	16,39	266,44	-0,67	201,45
3200	660,21	-0,40	0,72	8951,02	0,24	0,39
3300	679,70	2,30	6,94	5878,81	0,34	36,17
3500	690,06	-2,40	13,58	604,73	-0,76	138,38
3600	697,59	-0,80	5,72	5946,18	0,24	24,56
3650	703,21	-1,40	7,56	4829,77	0,47	42,81
3700	720,56	0,60	10,22	4919,93	0,15	78,37
3900	725,62	1,80	12,83	-2896,54	-1,16	123,52
3950	731,81	-0,30	6,94	8631,15	0,37	36,17
4000	741,43	-0,20	9,22	4479,07	0,24	63,79
4100	756,48	-0,20	11,56	6442,25	0,23	100,15
4300	764,90	-1,30	15,03	-2681,45	-0,75	169,38
4400	773,55	-2,00	8,72	14731,27	0,65	57,06
4500	780,42	-0,30	14,39	3355,70	0,05	155,28
4600	787,55	1,90	14,72	4553,52	-0,19	162,56

Tabla 4.4: Parámetros Ruta Condominio El Pacifico - Universidad Politécnica Salesiana - Parte B

Posición] [m]	Δ Tiempo [s]	Elevación %	Velocidad [m/s]	Potencia [kW]	Aceleración [m/s]	Resistencia Aerodinámica
4700	802,46	3,8	13,33	10619,69	0,01	133,33
4900	809,90	4	13,50	9388,94	-0,01	136,69
5000	813,60	4,6	13,39	11420,98	0,05	134,45
5050	817,62	5,1	13,58	2972,27	-0,57	138,38
5100	828,70	3,9	11,31	2375,57	-0,41	95,86
5200	835,06	1,1	6,75	9302,38	0,35	34,17
5250	844,92	0,7	8,97	5103,15	0,24	60,38
5350	849,07	0,6	11,31	7556,92	0,37	95,86
5400	868,76	0,8	12,83	749,25	-0,27	123,52
5600	911,18	-5,1	7,47	-2846,36	0,09	41,88
6000	921,32	-4,4	11,39	-1941,22	-0,30	97,28
6100	951,49	-2,3	8,33	1891,15	0,11	52,08
6400	962,46	-2,9	11,56	-1493,57	-0,45	100,15
6500	981,29	-10,3	6,67	-7001,78	0,42	33,33
6700	988,54	-7,3	14,58	-2941,62	-0,22	159,51
6800	996,83	-3,1	13,00	-2652,14	-0,23	126,75
6900	1005,45	-0,5	11,11	4981,92	0,12	92,59
7000	1017,73	1,7	12,11	-549,88	-0,65	110,01
7100	1053,64	-3,9	4,17	-1421,48	0,08	13,02
7300	1072,84	0,5	6,97	62,59	-0,18	36,46
7400	1087,69	1,8	3,44	11184,65	0,44	8,90
7500	1101,27	2	10,03	-141,99	-0,39	75,42

RUTA: Condominio El Pacifico - Universidad Politécnica Salesiana Los datos obtenidos para el análisis en la trayectoria Condominio El Pacifico -Universidad Politécnica Salesiana se reflejan en la Tabla 4.3 y 4.4.

4.2. Evaluación de la batería

En el estudio desarrollado se lleva a cabo distintos recorridos del vehículo con el fin de determinar el rendimiento de la batería. Para el modelado de la batería en este estudio, se toman los datos recolectados (potencia, tiempo) cuando el vehículo se somete a un recorrido donde, tanto el estado de carga *SOC* como el estado de salud *SOH* se encuentran en un nivel del 100%. Se consideran las características del trayecto recorrido consisten en vías, donde se circula a una velocidad promedio de

60km/h, con pendientes y descensos pronunciados. El recorrido se puede visualizar en la Fig. 3.1. La adquisición de datos se la realiza cada segundo, de tal manera que la lectura de datos es precisa con el fin de determinar el *SOH* de la batería después de someterse a varias repeticiones de la trayectoria y ciclos de carga/descarga de la batería. El rendimiento y el envejecimiento de las baterías dependen en gran parte de la temperatura, en este caso se considero una temperatura variable entre 15 °C y 25 °C.

Con el fin de evaluar al número de ciclos al que puede ser sometida una batería de litio durante la vida útil, se ha decidido realizar una evaluación específica basada en el número de trayectorias necesarias para cumplir con procesos de carga y descarga que serán observados en las gráficas *SOC*, con el fin de evaluar el número máximo de ciclos que puede someterse la batería hasta su posterior declive, posterior se reflejara el envejecimiento de la batería, considerando que una batería al llegar al 90% de estado de salud esta debe ser reemplazada, dicho deterioro sera observado en las gráficas de *SOH*.

Se planea llevar a cabo un total de 6 pruebas para evaluar el rendimiento en dos escenarios diferentes: tres pruebas sin frenado regenerativo y tres pruebas con frenado regenerativo.

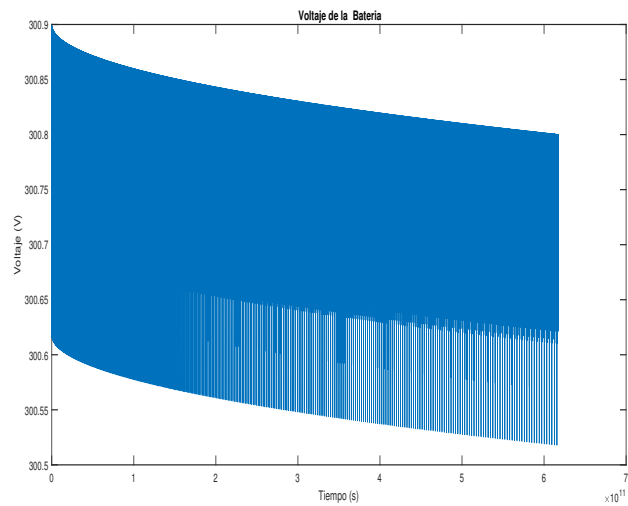
A continuación, se realizarán las tres pruebas sin el uso del frenado regenerativo, las cuales proporcionarán un punto de referencia para comparar con las pruebas siguientes:

4.2.1. Primera prueba

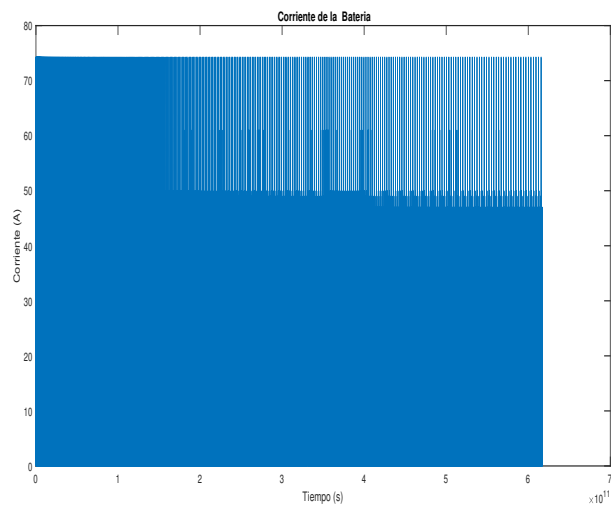
La primera prueba se desarrolla con 397 repeticiones de la trayectoria, en la cual, cada repetición del trayecto tiene una distancia de 15,3km tomando en cuenta el trayecto de ida y vuelta en la ruta que abarca la Universidad Politécnica Salesiana y el condominio El Pacifico, en el cantón Cuenca, sin el uso del freno regenerativo.

Con los parámetros inicialmente obtenidos de la batería y con ayuda del algoritmo realizado en Matlab, en la Fig. 4.1, se presentan los gráficos que ilustran el Voltaje y Corriente con sus respectivos valores según la trayectoria recorrida.

4 CAPÍTULO 4: Simulaciones y Análisis de Resultados



(a) Voltaje de la batería



(b) Corriente de la batería

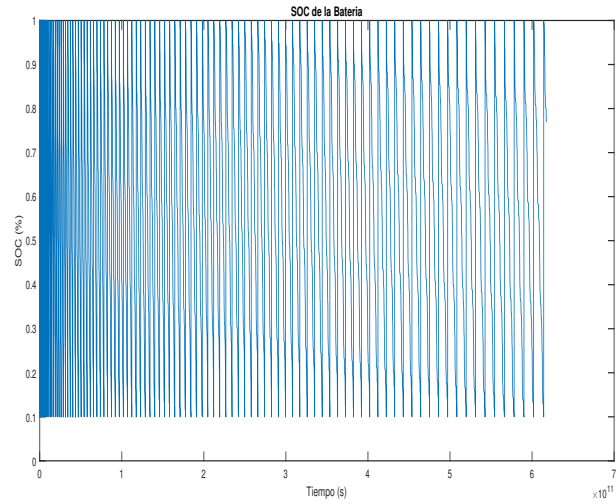
Figura 4.1: Gráfica de Voltaje y Corriente sin utilizar frenado regenerativo durante la prueba 1

La Fig. 4.1a, muestra el voltaje de la batería, el cual varía mínimamente entre $300,9V$ al inicio de la prueba a $300,5V$ culminado las 397 repeticiones a la trayectoria, los recorridos ascendentes se realizan a velocidades variables que van desde los $4m/s$ por motivo del tráfico hasta los $16,6m/s$ que es la velocidad estimada en este proyecto. La Fig. 4.1b, se observa que el consumo de corriente es más alto al inicio debido al

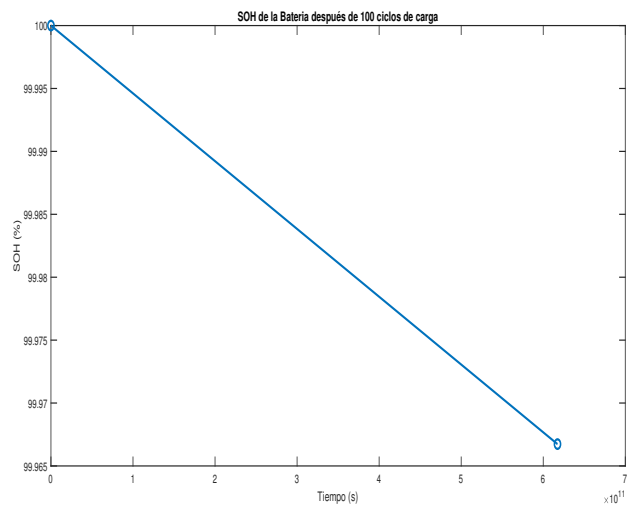
4 CAPÍTULO 4: Simulaciones y Análisis de Resultados

inicio del movimiento del vehículo, luego los valores se estabilizan a medida que alcanza una velocidad constante.

A continuación, en la Fig. 4.2, se presentan los gráficos que ilustran el *SOC* y *SOH* luego de realizar 100 ciclos de carga.



(a) SOC de la batería



(b) SOH de la batería

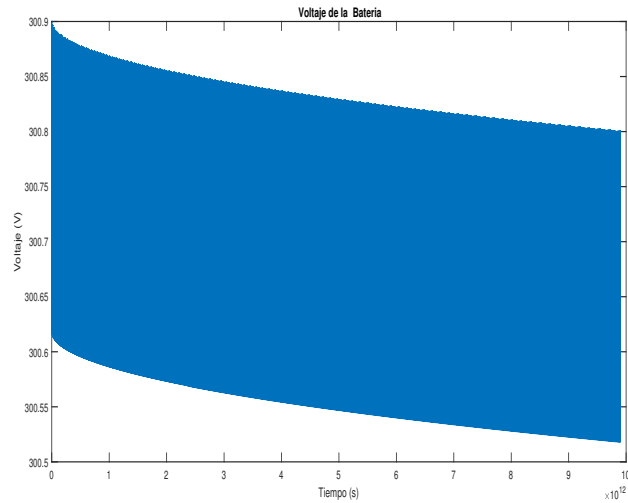
Figura 4.2: Gráfica de SOC y SOH sin utilizar frenado regenerativo durante la prueba

La Fig. 4.2a, muestra la evolución del *SOC* de la batería a lo largo de la trayectoria, donde se refleja que después de 100 ciclos de carga el vehículo aun tiene un 76,955066 % de carga restante aun para las 397 repeticiones a la ruta propuesta. La Fig. 4.2b, muestra el porcentaje del estado de salud de la batería *SOH*, el cual equivale a 99,966736 %, mostrando que la vida útil del acumulador apenas ha experimentado alteraciones, con un desgaste mínimo.

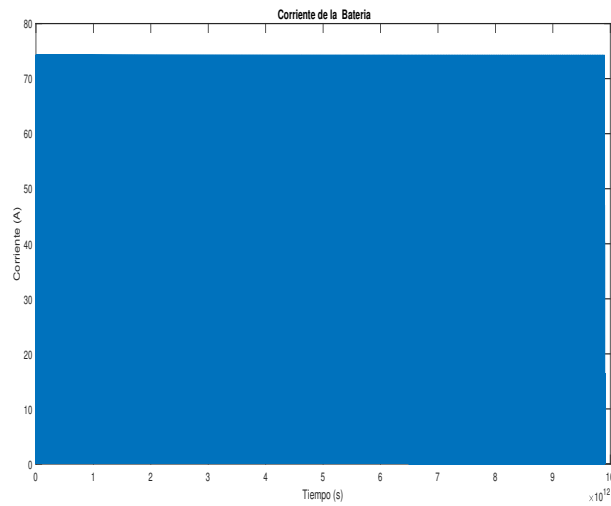
4.2.2. Segunda prueba

La segunda prueba se desarrolla con 1590 repeticiones de la trayectoria, en la cual, cada repetición del trayecto tiene una distancia de 15,3km tomando en cuenta el trayecto de ida y vuelta en la ruta que abarca la Universidad Politécnica Salesiana y el condominio El Pacifico, en el cantón Cuenca, sin el uso del freno regenerativo.

Con los parámetros inicialmente obtenidos de la batería y con ayuda del algoritmo realizado en Matlab, en la Fig. 4.3, se presentan los gráficos que ilustran el Voltaje y Corriente con sus respectivos valores según la trayectoria recorrida.



(a) Voltaje de la batería



(b) Corriente de la batería

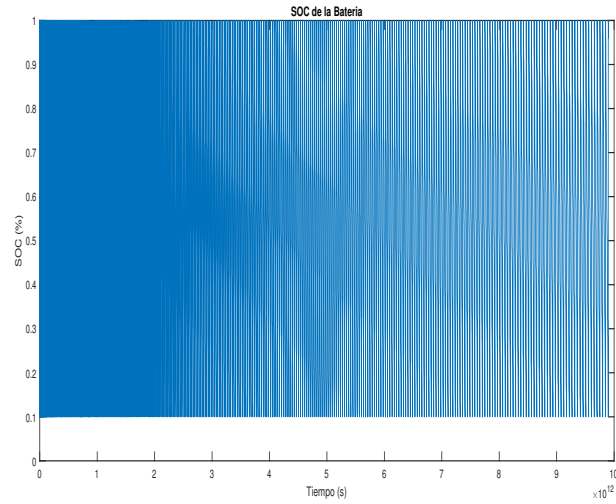
Figura 4.3: Gráfica de Voltaje y Corriente sin utilizar frenado regenerativo durante la prueba 2

La Fig. 4.3a, muestra el voltaje de la batería, el cual varía mínimamente entre $300,9V$ al inicio de la prueba a $300,53V$ culminado las 1590 repeticiones a la trayectoria, los recorridos ascendentes se realizan a velocidades variables que van desde los $4m/s$ por motivo del tráfico hasta los $16,6m/s$ que es la velocidad estimada en este proyecto. La Fig. 4.3b, se observa que el consumo de corriente es más alto al

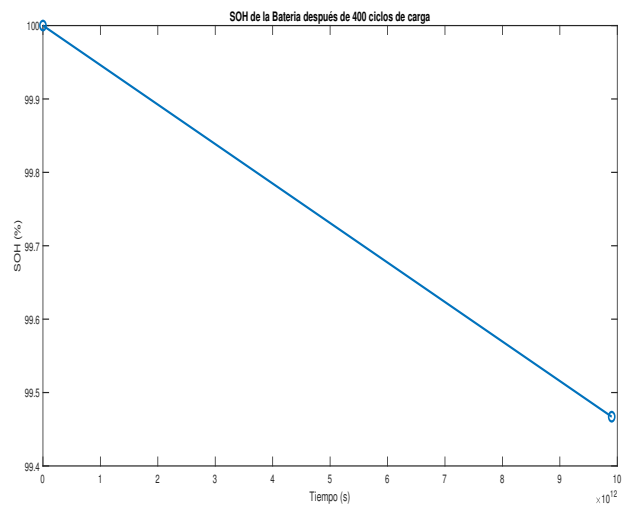
4 CAPÍTULO 4: Simulaciones y Análisis de Resultados

inicio debido al inicio del movimiento del vehículo, luego los valores se estabilizan a medida que alcanza una velocidad constante.

A continuación, en la Fig. 4.4, se presentan los gráficos que ilustran el *SOC* y *SOH* luego de realizar 400 ciclos de carga.



(a) SOC de la batería



(b) SOH de la batería

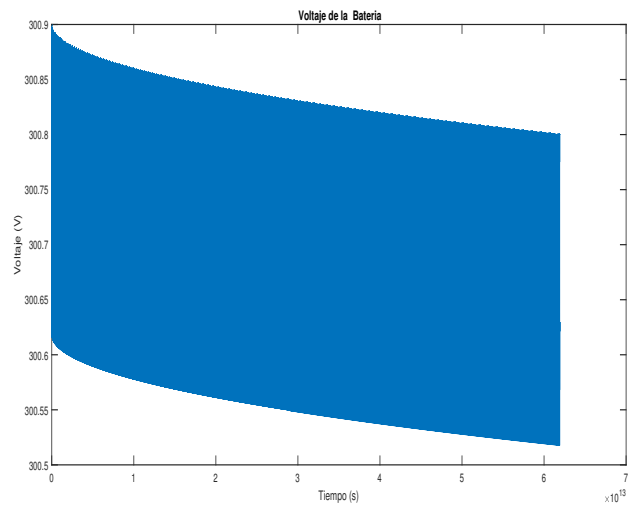
Figura 4.4: Gráfica de SOC y SOH sin utilizar frenado regenerativo durante la prueba

La Fig. 4.4a, muestra la evolución del *SOC* de la batería a lo largo de la trayectoria, donde se refleja que después de 400 ciclos de carga el vehículo aun tiene un 95,970332% de carga restante aun para las 1590 repeticiones a la ruta propuesta. La Fig. 4.4b, muestra el porcentaje del estado de salud de la batería *SOH*, el cual equivale a 99,467113%, mostrando que la vida útil del acumulador apenas ha experimentado alteraciones, con un desgaste mínimo.

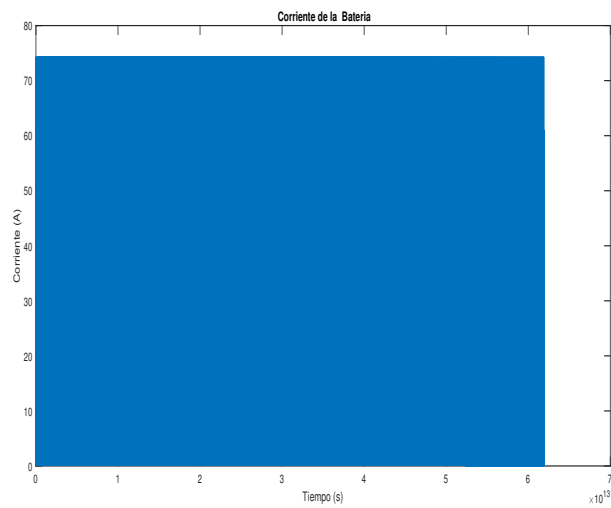
4.2.3. Tercera prueba

La tercera prueba se desarrolla con 3976 repeticiones de la trayectoria, en la cual, cada repetición del trayecto tiene una distancia de 15,3km tomando en cuenta el trayecto de ida y vuelta en la ruta que abarca la Universidad Politécnica Salesiana y el condominio El Pacifico, en el cantón Cuenca, sin el uso del freno regenerativo.

Con los parámetros inicialmente obtenidos de la batería y con ayuda del algoritmo realizado en Matlab, en la Fig. 4.5, se presentan los gráficos que ilustran el Voltaje y Corriente con sus respectivos valores según la trayectoria recorrida.



(a) Voltaje de la batería



(b) Corriente de la batería

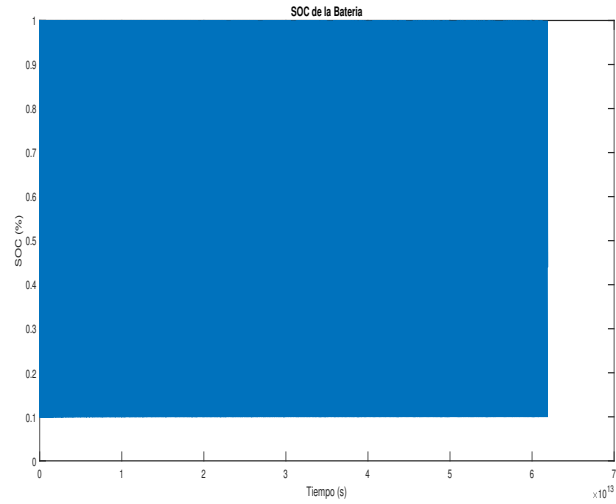
Figura 4.5: Gráfica de Voltaje y Corriente sin utilizar frenado regenerativo durante la prueba 3

La Fig. 4.5a, muestra el voltaje de la batería, el cual varía mínimamente entre 300,9V al inicio de la prueba a 300,53V culminado las 3976 repeticiones a la trayectoria, los recorridos ascendentes se realizan a velocidades variables que van desde los 4m/s por motivo del tráfico hasta los 16,6m/s que es la velocidad estimada en este proyecto. La Fig. 4.5b, se observa que el consumo de corriente es más alto al

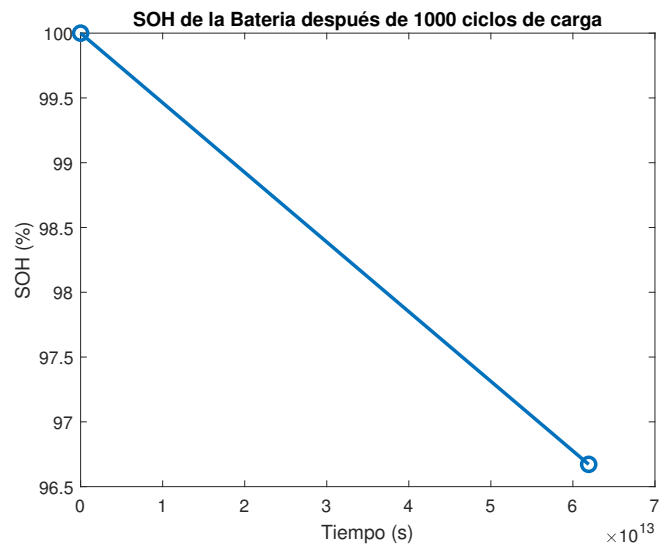
4 CAPÍTULO 4: Simulaciones y Análisis de Resultados

inicio debido al inicio del movimiento del vehículo, luego los valores se estabilizan a medida que alcanza una velocidad constante.

A continuación, en la Fig. 4.6, se presentan los gráficos que ilustran el *SOC* y *SOH* luego de realizar 1000 ciclos de carga.



(a) SOC de la batería



(b) SOH de la batería

Figura 4.6: Gráfica de SOC y SOH sin utilizar frenado regenerativo durante la prueba
3

La Fig. 4.6a, muestra la evolución del *SOC* de la batería a lo largo de la trayectoria, donde se refleja que después de 1000 ciclos de carga el vehículo aun tiene un 43,969740 % de carga restante aun para las 3976 repeticiones a la ruta propuesta. La Fig. 4.6b, muestra el porcentaje del estado de salud de la batería *SOH*, el cual equivale a 96,671959 %, mostrando que la vida útil del acumulador ha experimentado alteraciones, con un desgaste considerable.

4.3. Frenado regenerativo

El frenado regenerativo es un sistema que se utiliza en vehículos eléctricos e híbridos para recuperar la energía cinética que se pierde durante la desaceleración y el frenado, el cual puede producir un ahorro de energía entre el 10 % y 15 %.

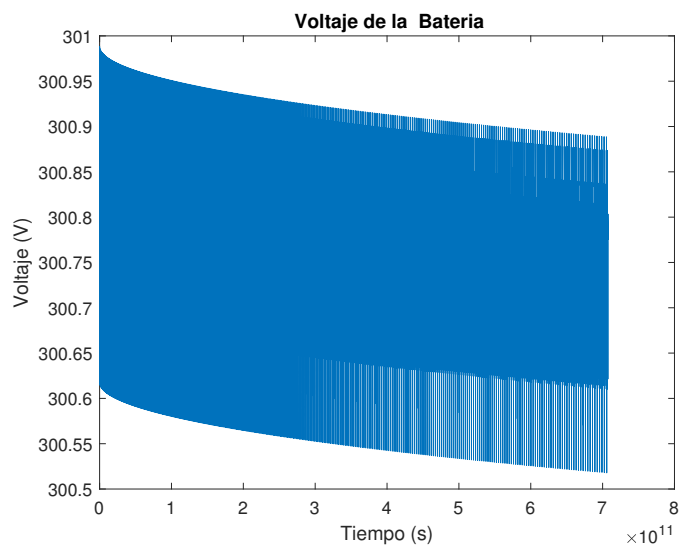
Cuando se aplica el freno de pedal, el motor cambia de funcionar como motor de corriente alterna a convertirse en un generador de corriente. Esto permite la carga de las baterías cuando el pedal de freno se activa durante una desaceleración o al descender.

A continuación se realizarán 3 pruebas usando el frenado regenerativo con los distintos ciclos de carga.

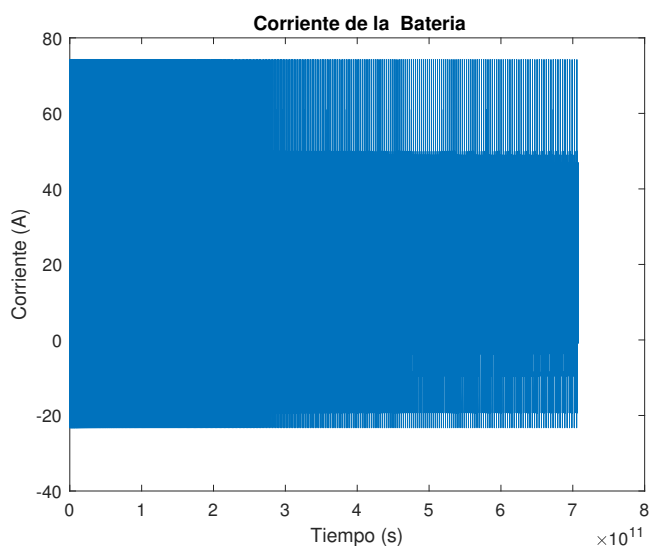
4.3.1. Primera prueba

La primera prueba se desarrolla con 425 repeticiones de la trayectoria, en la cual, cada repetición del trayecto tiene una distancia de 15,3km tomando en cuenta el trayecto de ida y vuelta en la ruta que abarca la Universidad Politécnica Salesiana y el condominio El Pacifico, en el cantón Cuenca, con el uso del freno regenerativo.

Con los parámetros inicialmente obtenidos de la batería y con ayuda del algoritmo realizado en Matlab, en la Fig. 4.7, se presentan los gráficos que ilustran el Voltaje y Corriente con sus respectivos valores según la trayectoria recorrida.



(a) Voltaje de la batería



(b) Corriente de la batería

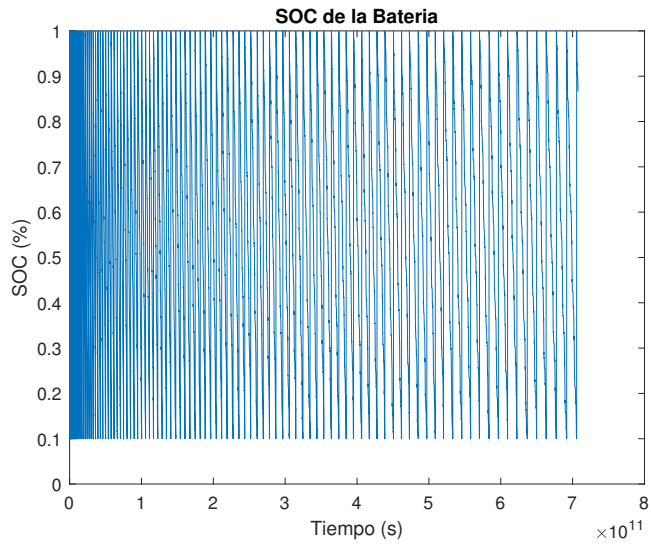
Figura 4.7: Gráfica de Voltaje y Corriente utilizando frenado regenerativo durante la prueba 1

La Fig. 4.7a, muestra el voltaje de la batería, el cual varía mínimamente entre 301V al inicio de la prueba a 300,53V culminado las 425 repeticiones a la trayectoria, los recorridos ascendentes se realizan a velocidades variables que van desde los $4m/s$ por motivo del tráfico hasta los $16,6m/s$ que es la velocidad estimada en este proyecto.

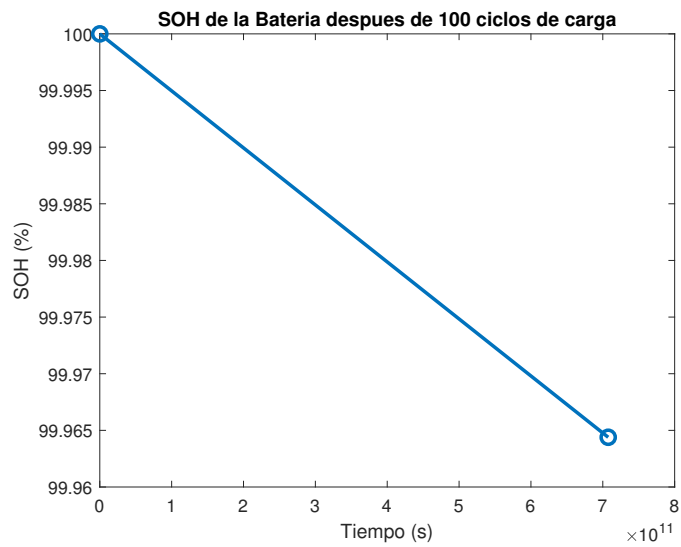
4 CAPÍTULO 4: Simulaciones y Análisis de Resultados

La Fig. 4.7b, se observa que el consumo de corriente es más alto al inicio debido al inicio del movimiento del vehículo, luego los valores se estabilizan a medida que alcanza una velocidad constante.

A continuación, en la Fig. 4.8, se presentan los gráficos que ilustran el *SOC* y *SOH* luego de realizar 100 ciclos de carga.



(a) SOC de la batería



(b) SOH de la batería

Figura 4.8: Gráfica de SOC y SOH utilizando frenado regenerativo durante la prueba 1

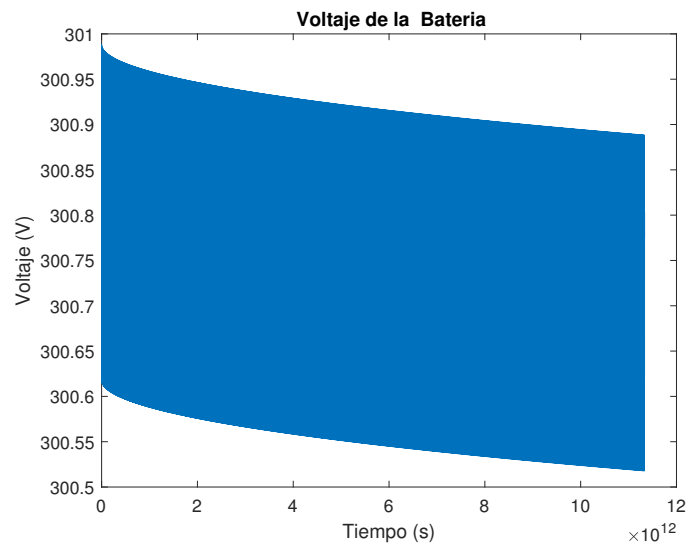
La Fig. 4.8a, muestra la evolución del *SOC* de la batería a lo largo de la trayectoria, donde se refleja que después de 100 ciclos de carga el vehículo aun tiene un 86,664187% de carga restante aun para las 425 repeticiones a la ruta propuesta. La Fig. 4.8b, muestra el porcentaje del estado de salud de la batería *SOH*, el

cual equivale a 99,964390%, mostrando que la vida útil del acumulador apenas ha experimentado alteraciones, con un desgaste mínimo.

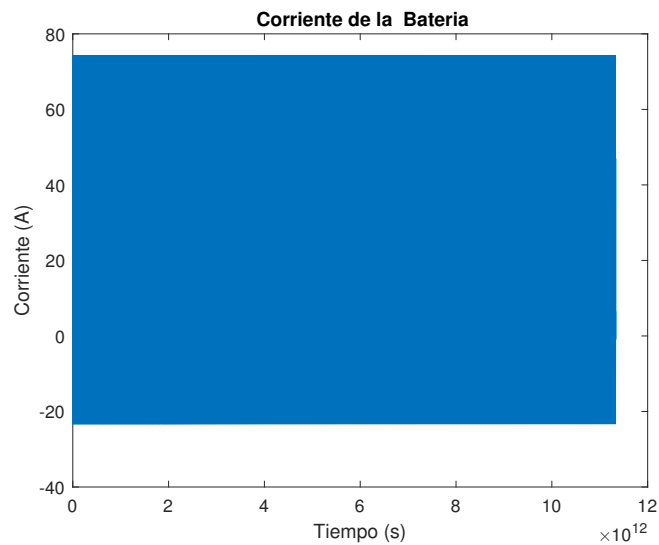
4.3.2. Segunda prueba

La segunda prueba se desarrolla con 1702 repeticiones de la trayectoria, en la cual, cada repetición del trayecto tiene una distancia de 15,3km tomando en cuenta el trayecto de ida y vuelta en la ruta que abarca la Universidad Politécnica Salesiana y el condominio El Pacifico, en el cantón Cuenca, con el uso del freno regenerativo.

Con los parámetros inicialmente obtenidos de la batería y con ayuda del algoritmo realizado en Matlab, en la Fig. 4.9, se presentan los gráficos que ilustran el Voltaje y Corriente con sus respectivos valores según la trayectoria recorrida.



(a) Voltaje de la batería



(b) Corriente de la batería

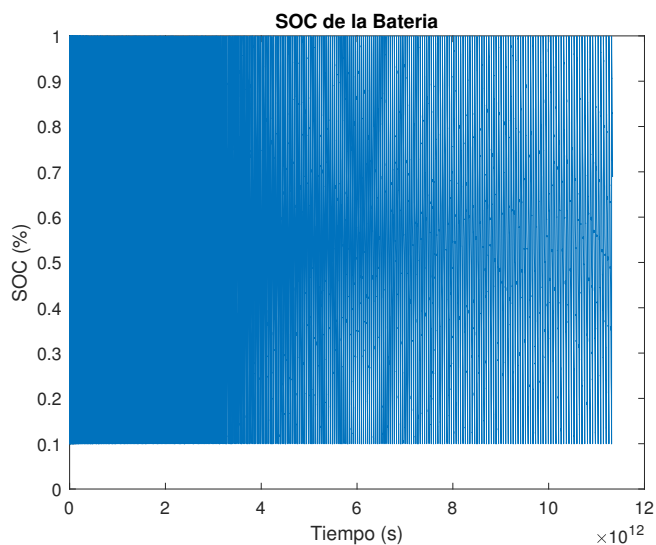
Figura 4.9: Gráfica de Voltaje y Corriente utilizando frenado regenerativo durante la prueba 2

La Fig. 4.9a, muestra el voltaje de la batería, el cual varía mínimamente entre 301V al inicio de la prueba a 300,5V culminado las 1702 repeticiones a la trayectoria, los recorridos ascendentes se realizan a velocidades variables que van desde los 4m/s por motivo del tráfico hasta los 16,6m/s que es la velocidad estimada en este proyecto.

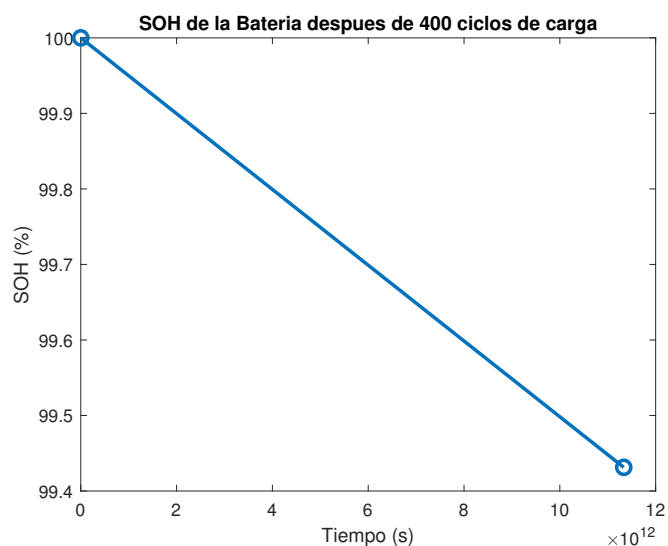
4 CAPÍTULO 4: Simulaciones y Análisis de Resultados

La Fig. 4.9b, se observa que el consumo de corriente es más alto al inicio debido al inicio del movimiento del vehículo, luego los valores se estabilizan a medida que alcanza una velocidad constante.

A continuación, en la Fig. 4.10, se presentan los gráficos que ilustran el *SOC* y *SOH* luego de realizar 400 ciclos de carga.



(a) SOC de la batería



(b) SOH de la batería

Figura 4.10: Gráfica de SOC y SOH utilizando frenado regenerativo durante la prueba 2

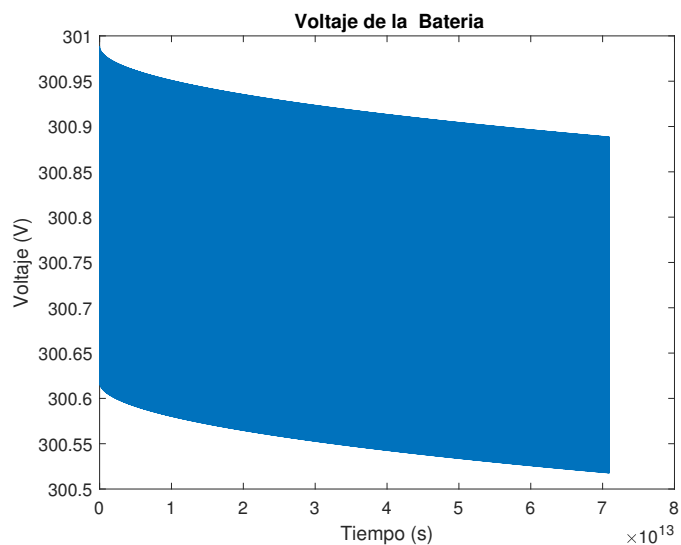
La Fig. 4.10a, muestra la evolución del *SOC* de la batería a lo largo de la trayectoria, donde se refleja que después de 400 ciclos de carga el vehículo aun tiene un 68,849506 % de carga restante aun para las 1702 repeticiones a la ruta propuesta. La Fig. 4.10b, muestra el porcentaje del estado de salud de la batería *SOH*, el

cual equivale a 99,431337%, mostrando que la vida útil del acumulador apenas ha experimentado alteraciones, con un desgaste mínimo.

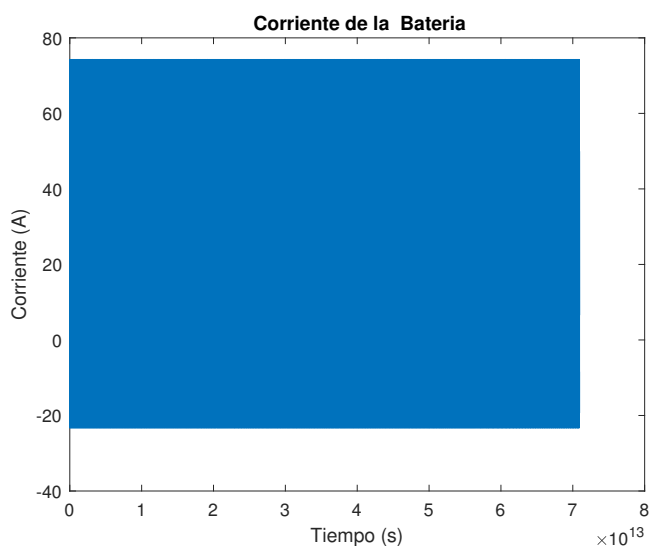
4.3.3. Tercera prueba

La tercera prueba se desarrolla con 4256 repeticiones de la trayectoria, en la cual, cada repetición del trayecto tiene una distancia de 15,3km tomando en cuenta el trayecto de ida y vuelta en la ruta que abarca la Universidad Politécnica Salesiana y el condominio El Pacifico, en el cantón Cuenca, con el uso del freno regenerativo.

Con los parámetros inicialmente obtenidos de la batería y con ayuda del algoritmo realizado en Matlab, en la Fig. 4.11, se presentan los gráficos que ilustran el Voltaje y Corriente con sus respectivos valores según la trayectoria recorrida.



(a) Voltaje de la batería



(b) Corriente de la batería

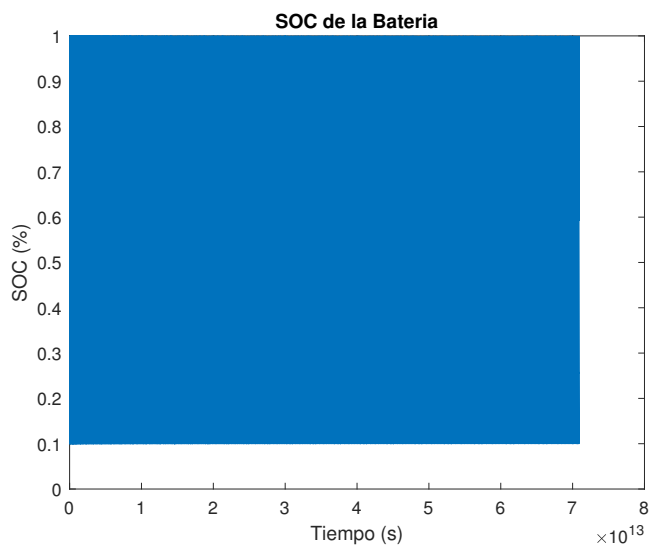
Figura 4.11: Gráfica de Voltaje y Corriente utilizando frenado regenerativo durante la prueba 3

La Fig. 4.11a, muestra el voltaje de la batería, el cual varía mínimamente entre 301V al inicio de la prueba a 300,55V culminado las 4256 repeticiones a la trayectoria, los recorridos ascendentes se realizan a velocidades variables que van desde los 4m/s por motivo del tráfico hasta los 16,6m/s que es la velocidad estimada en este

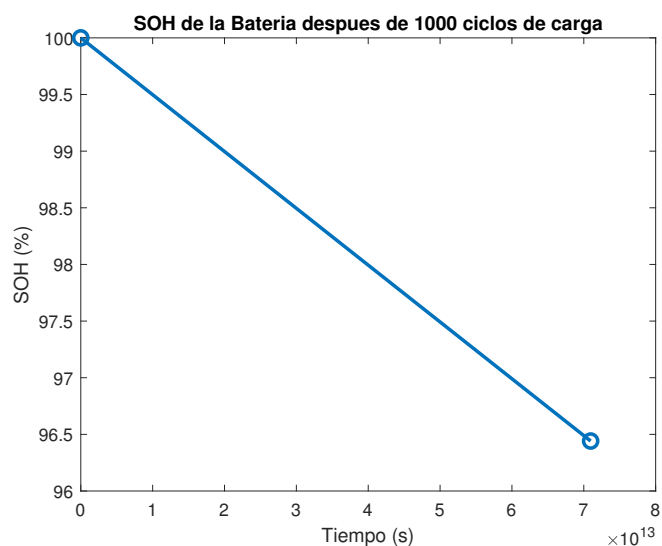
4 CAPÍTULO 4: Simulaciones y Análisis de Resultados

proyecto. La Fig. 4.11b, se observa que el consumo de corriente es más alto al inicio debido al inicio del movimiento del vehículo, luego los valores se estabilizan a medida que alcanza una velocidad constante.

A continuación, en la Fig. 4.12, se presentan los gráficos que ilustran el *SOC* y *SOH* luego de realizar 1000 ciclos de carga.



(a) SOC de la batería



(b) SOH de la batería

Figura 4.12: Gráfica de SOC y SOH utilizando frenado regenerativo durante la prueba 3

La Fig. 4.12a, muestra la evolución del *SOC* de la batería a lo largo de la trayectoria, donde se refleja que después de 1000 ciclos de carga el vehículo aun tiene un 59,255981% de carga restante aun para las 4256 repeticiones a la ruta propuesta. La Fig. 4.12b, muestra el porcentaje del estado de salud de la batería *SOH*, el cual

equivale a 96,441156 %, mostrando que la vida útil del acumulador ha experimentado alteraciones, con un desgaste considerable.

4.4. Análisis de resultados

Los resultados de parámetros como ciclos de carga, repeticiones de trayectoria, *SOC* y *SOH* con y sin regeneración realizadas a la ruta se reflejan en la Tabla 4.5.

(a) Sin frenado regenerativo

Parámetro	<i>Ciclos_{carga}</i>	<i>Repeticiones_{trayectoria}</i>	<i>SOC</i> [%]	<i>SOH</i> [%]
Prueba 1	100	397	76.955066	99.966736
Prueba 2	400	1590	95.970332	99.467113
Prueba 3	1000	3976	43.969740	96.671959

(b) Con frenado regenerativo

Parámetro	<i>Ciclos_{carga}</i>	<i>Repeticiones_{trayectoria}</i>	<i>SOC</i> [%]	<i>SOH</i> [%]
Prueba 1	100	425	86.664187	99.964390
Prueba 2	400	1702	68.849506	99.431337
Prueba 3	1000	4256	59.255981	96.441156

Tabla 4.5: Resultados de pruebas

La Tabla. 4.5a, muestra los resultados sin el uso del frenado regenerativo para la trayectoria comprendida entre la Universidad Politécnica Salesiana y el Condominio El Pacifico. La Tabla 4.5b, refleja los resultados al usar del frenado regenerativo.

5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Se ha desarrollado una base de información bibliográfica respecto a los vehículos eléctricos, donde se analiza su funcionamiento y prestaciones a lo largo de los años, considerando especialmente el comportamiento de la batería y su vida útil en relación con los procesos de frenado regenerativo.

Por medio de una revisión de artículos científicos se presenta una descripción detallada de un modelo de Thévenin de 2^o orden, para garantizar la compatibilidad entre el esquema del modelo de circuito equivalente y el modelo electro-químico, justificando el comportamiento dinámico de las baterías.

Al realizar la verificación del modelo de la batería de ión-litio en Matlab®[®], con parámetros de funcionamiento para un vehículo eléctrico descritos en la Tabla 3.2 se ha llegado a satisfacer los objetivos planteados al inicio del trabajo, utilizando un arreglo de 94 celdas en serie y 4 en paralelo, para obtener un voltaje nominal de 300,8 V con una corriente de 74,22 A y una capacidad de carga de 288,768 Ah.

Se ha logrado simular un modelo de vehículo eléctrico con batería de ión-litio, considerando una trayectoria real, comprendida entre la Universidad Politécnica Salesiana y el Condominio El Pacifico, en la ciudad de Cuenca. A través de estas simulaciones se determina que la autonomía y prestaciones de la batería cubren por completo las necesidades de circulación en la ruta establecida, que comprende una velocidad promedio de 60 km/h, con pendientes y descensos pronunciados, al abarcar los diversos parámetros mencionados en la Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4.

A partir del código de Matlab, que contiene un modelo de una batería de litio para el vehículo eléctrico con las propiedades indicadas en la Tabla 3.1 y respaldadas por la trayectoria establecida en la Fig. 3.1, se realizaron distintos recorridos del vehículo con el fin de determinar el rendimiento de la batería, donde el *SOC* y *SOH* se encuentran en un nivel del 100%. La adquisición de datos se la realizó cada segundo, con el fin de determinar el *SOH* de la batería después de someterse a varias repeticiones de la trayectoria y ciclos de carga/descarga. El rendimiento y

el envejecimiento de las baterías dependen en gran parte de la temperatura. En este trabajo se consideró una temperatura variable entre 15°C y 25°C .

Para la evaluación del número de ciclos al que puede ser sometida una batería de litio durante la vida útil, se realizaron repeticiones a la trayectoria para cumplir con procesos de carga y descarga que serán observados en las gráficas *SOC*, donde se evita descargarla por completo y mantenerla en un estado de carga parcial superior al 10%. Posterior se reflejara el envejecimiento de la batería, considerando que una batería al llegar al 90% de estado de salud esta debe ser reemplazada, dicho deterioro será observado en las gráficas de *SOH* de la sección 4.2.

Se desarrollaron seis pruebas con el fin de obtener una perspectiva más completa y precisa de la autonomía del vehículo eléctrico cuando se utilice frenado regenerativo durante los trayectos donde esta posibilidad es factible, determinando que al usar el frenado regenerativo, este permite tener 7% más de autonomía que al no usarlo.

El estado de salud de la batería no sufre un deterioro notable si los ciclos de carga son menores a 1000. Esto indica que la batería ha demostrado una notable resistencia y capacidad para mantener su rendimiento a pesar de un uso frecuente y repetitivo. Mientras que es más notable su desgaste posterior a los 1000 ciclos, donde el vehículo tiene la autonomía para realizar 3976 repeticiones a la trayectoria, sin utilizar frenado regenerativo, manteniendo en un nivel del 96,67% el *SOH*. De igual forma, se analiza el uso del frenado regenerativo, donde el vehículo alcanza una autonomía de 4256 repeticiones a la ruta manteniendo en un nivel del 96,44% el *SOH*.

Se corrobora que utilizar el frenado regenerativo ayuda a incrementar la eficiencia y la autonomía del vehículo. Sin embargo, la batería sufre mayor desgaste en su estado de salud debido a que regenera parte de la energía durante el frenado y la almacena en la batería. Esto se ve reflejado en la Tabla 4.5.

5.2. Recomendaciones

Es recomendable efectuar futuras investigaciones partiendo del tema estudiado, debido a que existen diversos modelos de las baterías. Sería de suma importancia estudiar varias de estos modelos con el fin de obtener más precisión y mejores prestaciones.

También es necesario estudiar el efecto del envejecimiento de las baterías cuando son sometidas tanto a carga rápida como a carga lenta. Dado que estos tipos de carga pueden tener un impacto en la duración y el rendimiento de los acumuladores de los

5 Conclusiones y Recomendaciones

vehículos eléctricos.

Se propone la implementación de nuevas rutas de conducción para evaluar la capacidad a la que puede ser sometida una batería de ión-litio en trayectos de mayor exigencia.

Bibliografía

- [1] F. D. Chancusig Guerrero, “Análisis técnico económico para la inserción de vehículos eléctricos en el sistema eléctrico ecuatoriano,” bachelor’s thesis, quito: epn, 2014.
- [2] S. de Tecnicos de Automocion STA, *El vehículo eléctrico: Desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio*. Librooks, Dec. 2021.
- [3] S. Heydari, P. Fajri, R. Sabzehgar, and A. Asrari, “Optimal brake allocation in electric vehicles for maximizing energy harvesting during braking,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 4, pp. 1806–1814, 2020.
- [4] S. S. Bhurse and A. Bhole, “A review of regenerative braking in electric vehicles,” in *2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, pp. 363–367, 2018.
- [5] V. Totev and V. Gueorgiev, “Efficiency of regenerative braking in electric vehicles,” in *2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, pp. 1–4, 2020.
- [6] L. Li, Y. Zhang, C. Yang, B. Yan, and C., “Model predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus,” *Energy Conversion and Management*, vol. 111, pp. 299–314, 2016.
- [7] M.-J. Yang, H.-L. Jhou, B.-Y. Ma, and K.-K. Shyu, “A cost-effective method of electric brake with energy regeneration for electric vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 2203–2212, 2009.
- [8] X. Zhang, D. Gohlich, and J. Li, “Energy-efficient torque allocation design of traction and regenerative braking for distributed drive electric vehicles,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 1, pp. 285–295, 2018.
- [9] J. D. Torres Sarmiento, “Estudio de viabilidad en la implementación de vehículos eléctricos en la ciudad de Cuenca,” B.S. thesis, 2015.

Bibliografía

- [10] P. W. M. Torres, M. F. G. Berrezueta, and A. F. L. Mena, “Análisis de la viabilidad para la implementación de vehículo eléctrico que preste servicio de taxi en la ciudad de Cuenca,” *INNOVA Research Journal*, vol. 5, pp. 295–308, dec 2020.
- [11] K. HUANG, Y. Wang, and J. FENG, “Research on equivalent circuit model of lithium-ion battery for electric vehicles,” dec 2020.
- [12] M. R. M. Kassim, W. A. W. Jamil, and R. M. Sabri, “State-of-charge (SOC) and state-of-health (SOH) estimation methods in battery management systems for electric vehicles,” nov 2021.
- [13] M. R. Calle Salinas and A. G. Guiracocha Cajamarca, “Analysis of regenerative braking efficiency in an electric vehicle through experimental tests,” B.S. thesis universidad politecnica salesiana, 2021.
- [14] E. Araujo Asang, “Estudio y análisis del sistema de freno regenerativo del vehículo híbrido Toyota Prius,” bachelor’s thesis, guayaquil/uide, 2015.
- [15] R. Di Fonso and C. Cecati, “Test cycle simulation of an electric car with regenerative braking,” in *2020 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*, pp. 1–5, 2020.
- [16] B. Cajo and R. Carrasco, “Estudio de nuevas tecnologías aplicadas al diseño y control del sistema eléctrico en un vehículo impulsado eléctricamente,” 03 2010.
- [17] S. Sone, “Improvement of traction power feeding/regeneration system by means of energy storage devices,” in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, pp. 1–6, 2010.
- [18] O. Tremblay, L.-A. Dessaint, and A.-I. Dekkiche, “A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles,” sep 2007.
- [19] G. Saldaña, J. I. S. Martín, I. Zamora, F. J. Asensio, and O. Oñederra, “Analysis of the current electric battery models for electric vehicle simulation,” *Energies*, vol. 12, p. 2750, jul 2019.
- [20] T. Letrouve, A. Bouscayrol, W. Lhomme, N. Dollinger, and F. M. Calvairac, “Different models of a traction drive for an electric vehicle simulation,” sep 2010.
- [21] M. al T P, G. A. M. P, and A. Parvathy, “Development of electric vehicle model in matlab/ simulink,” apr 2022.

Bibliografia

- [22] C. Fiori, K. Ahn, and H. A. Rakha, “Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation,” *Applied Energy*, vol. 168, pp. 257–268, apr 2016.
- [23] H. Weiss, T. Winkler, and H. Ziegerhofer, “Large lithium-ion battery-powered electric vehicles — from idea to reality,” may 2018.
- [24] M. Jongerden and B. Haverkort, “Battery modeling,” *CTIT Report*, 01 2008.
- [25] D. Rakhmatov, S. Vrudhula, and D. Wallach, “A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer,” *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 11, pp. 1019–1030, Dec 2003.
- [26] M. Jongerden and B. Haverkort, “Which battery model to use?,” *IET Software*, vol. 3, no. 6, p. 445, 2009.
- [27] J. F. Manwell and J. G. McGowan, “Lead acid battery storage model for hybrid energy systems,” *Solar energy*, vol. 50, no. 5, pp. 399–405, 1993.
- [28] F. Arismendi, A. Gigena, A. Mosto, J. P. Carriquiry, and M. Vignolo, “Baterías en vehículos eléctricos conectados a la red,” nov 2021.
- [29] B. Devi and V. S. Kumar, “Lithium-ion battery management system: A review. in 2022 international conference on power, energy, control and transmission systems (icpects) (pp. 1-6). ieee.,” dec 2022.
- [30] K. Liu, K. Li, Q. Peng, and C. Zhang, “A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles,” *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 14, pp. 47–64, apr 2018.
- [31] M. A. Rahman, S. Anwar, and A. Izadian, “Electrochemical model parameter identification of a lithium-ion battery using particle swarm optimization method,” *Journal of Power Sources*, vol. 307, pp. 86–97, mar 2016.
- [32] W. Sung and C. B. Shin, “Electrochemical model of a lithium-ion battery implemented into an automotive battery management system,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 76, pp. 87–97, may 2015.
- [33] X. Han, M. Ouyang, L. Lu, and J. Li, “Simplification of physics-based electrochemical model for lithium ion battery on electric vehicle. part II: Pseudo-two-

Bibliografia

- dimensional model simplification and state of charge estimation,” *Journal of Power Sources*, vol. 278, pp. 814–825, mar 2015.
- [34] C. Zou, C. Manzie, and D. Nesic, “A framework for simplification of PDE-based lithium-ion battery models,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, pp. 1594–1609, sep 2016.
- [35] S. Nejad, D. Gladwin, and D. Stone, “A systematic review of lumped-parameter equivalent circuit models for real-time estimation of lithium-ion battery states,” *Journal of Power Sources*, vol. 316, pp. 183–196, jun 2016.
- [36] Q.-K. Wang, Y.-J. He, J.-N. Shen, Z.-F. Ma, and G.-B. Zhong, “A unified modeling framework for lithium-ion batteries: An artificial neural network based thermal coupled equivalent circuit model approach,” *Energy*, vol. 138, pp. 118–132, nov 2017.
- [37] F. Richter, S. Kjelstrup, P. J. Vie, and O. S. Burheim, “Thermal conductivity and internal temperature profiles of li-ion secondary batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 359, pp. 592–600, aug 2017.
- [38] X. Lin, H. E. Perez, S. Mohan, J. B. Siegel, A. G. Stefanopoulou, Y. Ding, and M. P. Castanier, “A lumped-parameter electro-thermal model for cylindrical batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 257, pp. 1–11, jul 2014.
- [39] S. Goutam, A. Nikolian, J. Jaguemont, J. Smekens, N. Omar, P. V. D. Bossche, and J. V. Mierlo, “Three-dimensional electro-thermal model of li-ion pouch cell: Analysis and comparison of cell design factors and model assumptions,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 126, pp. 796–808, nov 2017.
- [40] J. Jiang, H. Ruan, B. Sun, W. Zhang, W. Gao, L. Y. Wang, and L. Zhang, “A reduced low-temperature electro-thermal coupled model for lithium-ion batteries,” *Applied Energy*, vol. 177, pp. 804–816, sep 2016.
- [41] R. Xiong, J. Cao, Q. Yu, H. He, and F. Sun, “Critical review on the battery state of charge estimation methods for electric vehicles,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1832–1843, 2018.
- [42] E. Arabmakki and M. Kantardzic, “SOM-based partial labeling of imbalanced data stream,” *Neurocomputing*, vol. 262, pp. 120–133, nov 2017.

Bibliografía

- [43] M. A. Roscher, J. Assfalg, and O. S. Bohlen, "Detection of utilizable capacity deterioration in battery systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, pp. 98–103, jan 2011.
- [44] D. Wang, F. Yang, K.-L. Tsui, Q. Zhou, and S. J. Bae, "Remaining useful life prediction of lithium-ion batteries based on spherical cubature particle filter," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, pp. 1282–1291, jun 2016.
- [45] M. Gholizadeh and F. R. Salmasi, "Estimation of state of charge, unknown nonlinearities, and state of health of a lithium-ion battery based on a comprehensive unobservable model," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, pp. 1335–1344, mar 2014.
- [46] J. Aller, J. Restrepo, A. Bueno, T. Paga, V. Guzman, and M. Gimenez, "Sensorless speed control of the induction machine combining field oriented method and dtc," in *Proceedings of the 2000 Third IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems (Cat. No.00TH8474)*, pp. P79/1–P79/6, March 2000.
- [47] X. Jiaqun, T. Renyuan, and O. Minggao, "Improved direct torque control of permanent magnet synchronous motor in electric vehicle drive," sep 2008.
- [48] M. Merzoug and F. Naceri, "Comparison of field-oriented control and direct torque control for permanent magnet synchronous motor (pmsm)," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2, no. 9, pp. 1797–1802, 2008.
- [49] C. French and P. Acarnley, "Direct torque control of permanent magnet drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 5, pp. 1080–1088, 1996.
- [50] G. Noriega, J. Restrepo, V. Guzman, M. Gimenez, and J. Aller, "Direct torque control of pmsm using fuzzy logic with pwm," in *2007 42nd International Universities Power Engineering Conference*, pp. 203–209, Sep. 2007.
- [51] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, pp. 820–827, sep 1986.

Bibliografía

- [52] J. Rengifo, J. Aller, A. Berzoy, and J. Restrepo, “Predictive dtc algorithm for induction machines using sliding horizon prediction,” in *2014 IEEE 5th Latin American Symposium on Circuits and Systems*, pp. 1–4, Feb 2014.
- [53] J. Restrepo, J. M. Aller, V. M. Guzman, M. I. Gimenez, and J. C. Viola, “Switching strategies for dtc on asymmetric converters,” in *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1–9, Sep. 2009.
- [54] J. Aller, C. Candela, and G. Pesse, “Modelacion en transito de un vehiculo electrico para la estimacion de su demanda de energia sobre el sistema.,” *Congreso de Ingenieria Electrica - Venezuela*, 1983.
- [55] X. Zhang, J. Lu, S. Yuan, J. Yang, and X. Zhou, “A novel method for identification of lithium-ion battery equivalent circuit model parameters considering electrochemical properties,” *Journal of Power Sources*, vol. 345, pp. 21–29, 03 2017.