



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ**

### **TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ**

**TEMA: Desarrollo de un sistema electrónico para la autonomía en  
bicicletas eléctricas con freno regenerativo a base de  
supercondensadores.**

**AUTOR: Jefferson Fabián Chapi Casimba  
Ángel Eduardo Correa Sevilla**

**DIRECTOR: ING. Ignacio Bayardo Benavides Cevallos MSc**

**Ibarra, 2021**

# CERTIFICADO

## ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

### CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es **“Desarrollo de un sistema electrónico para la autonomía en bicicletas eléctricas con freno regenerativo a base de supercondensadores”** presentado por los señores: **Chapi Casimba Jefferson Fabián** con número de cédula 100408625-0 y **Correa Sevilla Ángel Eduardo** con número de cédula 172484965-6, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 10 días del mes de mayo del 2021.

Atentamente

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ignacio Benavides', with a stylized flourish at the end.

Ing. Ignacio Benavides MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	100408625-0		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Chapi Casimba Jefferson Fabián		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Otavalo, Carabuela calle 5 de Marzo.		
<b>EMAIL:</b>	jfchapic@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	(06) 6572-007	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0969245636

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	172484965-6		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Correa Sevilla Ángel Eduardo		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Cayambe, Calle 28 de Julio y Alberto Espinoza, E4-24.		
<b>EMAIL:</b>	aecorreas@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	(02) 2127-212	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0989316960

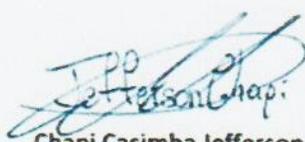
DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	<b>TEMA: DESARROLLO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA AUTONOMÍA EN BICICLETAS ELÉCTRICAS CON FRENO REGENERATIVO A BASE DE SUPERCONDENSADORES.</b>
<b>AUTOR (ES):</b>	Chapi Casimba Jefferson Fabián Correa Sevilla Ángel Eduardo
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	18 de marzo del 2021
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Ignacio Bayardo Benavides Cevallos MSc.

## 2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

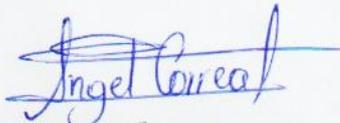
Ibarra, a los 14 días del mes de mayo de 2021

LOS AUTORES:



Chapi Casimba Jefferson Fabián

100408625-0



Correa Sevilla Ángel Eduardo

172484965-6

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de grado es dedicado primeramente a Dios por darme la salud durante todo este tiempo y bendecirme con la sabiduría para poder alcanzar mis objetivos, a mis padres Nancy Casimba y Fabian Chapi por haberme brindado la oportunidad de seguir con mis estudios y lograr mi meta de ser profesional, a mis hermanas que con sus palabras me han animado durante esta etapa.

**Jefferson Fabian Chapi Casimba**

Con mucho regocijo, amor y esperanza quiero dedicar mi trabajo de grado a mis padres, a mis abuelitos y demás familiares quienes han sido mis pilares para seguir adelante, por haberme forjado como la persona que actualmente soy; todos mis logros se los debo a ustedes y éste es uno mas de ellos. Me guiaron en mi formación profesional y personal con reglas y algunas libertades, pero al final de todo siempre me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos que con mucho esfuerzo, esmero y dedicación me lo he ganado.

**Ángel Eduardo Correa Sevilla**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por bendecirme con la vida y la salud, por darme la sabiduría para tomar las mejores decisiones durante mi vida.

A mis padres que me han guiado de la mejor manera durante cada etapa de mi vida, enseñándome a trabajar por mis objetivos e inculcándome valores.

A mis hermanas con quienes hemos pasado buenos y malos momentos, siempre han estado acompañándome y apoyándome en cada decisión tomada.

A mi familia que ha compartido su tiempo conmigo y que con sus consejos me han animado a seguir adelante.

A mis compañeros y amigos que han compartido su tiempo y conocimiento durante esta etapa, en especial a Cristian Fernández y Ángel Correa quienes con su inteligencia y forma de ser me han motivado a mejorar constantemente.

Agradezco de la forma más sincera a la Universidad Técnica del Norte por permitirme ocupar sus instalaciones y brindarme los mejores conocimientos en el transcurso de la carrera para desempeñarme de la mejor manera en el campo profesional. Así como, a todos los docentes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, quienes me han compartido sus conocimientos y experiencias, de manera especial al Ing. Ignacio Benavides y al Ing. Andrés Cevallos quienes fueron tutores de mi tesis, de igual manera agradezco a mis asesores por su contribución para la culminación del trabajo de grado.

**Jefferson Fabian Chapi Casimba**

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi gratitud a Dios por brindarme salud, sabiduría y fortaleza permitiéndome alcanzar una meta anhelada en mi formación profesional, agradezco la dicha de ser bendecido con una familia que a pesar de las adversidades siempre supieron inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía. Mi profundo agradecimiento a mi padre Ángel, que a lo largo de mi trayectoria personal fue un ejemplo de superación y dedicación, lucha y honestidad frente a cualquier circunstancia de la vida.

En mención especial, quiero expresar mi más sentido agradecimiento a mi madre Cristina, y a mi tío Xavier; mis ángeles que se encuentran en el cielo, durante su estadía junto a mí fueron las personas que me inculcaron y motivaron a elegir mi carrera por lo que han sido y serán los pilares fundamentales a quien agradeceré infinitamente. Agradezco a mi hermano Kevin, con quien a pie de lucha hemos compartido muchos momentos difíciles y algunos inverosímiles, pasando duros golpes de la vida pero a pesar de ello admiro su fortaleza y superación.

A mis segundos padres, mis abuelitos Francisco y Blanca quienes estuvieron presentes en la evolución y desarrollo total de mi trabajo de grado; soy la persona más afortunada por tenerlos vivos y sanos, agradeceré siempre todas las enseñanzas y por haberme inculcado todos los valores para que hoy en día sea la persona que soy, admiro su voz de aliento y su creencia inquebrantable de que puedo lograr lo que me proponga. A mis amigos, compañeros de profesión y futuros colegas con quien he compartido varias anécdotas durante mi estancia en la universidad, que entre “ires y venires” nos quedan muchas enseñanzas dentro y fuera de las aulas.

Extiendo mi profundo agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte por brindarme una educación de calidad y que ha aportado en gran medida el desarrollo de mi formación profesional. Y, por supuesto, agradezco a todos y cada uno de los docentes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz los cuales me impartieron sus conocimientos y experiencias, de manera especial a los ingenieros Ignacio Benavides, Ramiro Rosero y Jorge Melo; quienes han permitido culminar mi trabajo de grado de manera exitosa.

**Ángel Eduardo Correa Sevilla**

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

## PÁGINA

Índice de contenidos	i
Índice de tablas	iv
Índice de figuras	v
Índice de ecuaciones	vii
Índice de anexos	viii
<b>Resumen</b>	ix
<b>Abstract</b>	x
<b>Introducción</b>	xi
<b>Capítulo I</b>	1
<b>1. Revisión bibliográfica</b>	1
1.1    Objetivos	1
1.1.1    Objetivo general	1
1.1.2    Objetivos específicos	1
1.2    Justificación	1
1.3    Alcance	3
1.4    Antecedentes	3
1.5    Sistema de propulsión eléctrica	5
1.5.1    Motores eléctricos	5
1.5.2    Tipos de motores eléctricos	5
1.6    Control electrónico	6
1.6.1    Control de velocidad de motor de corriente directa	6
1.6.2    Sensores	7
1.6.3    Actuadores	8
1.7    Almacenamiento de energía	10

1.7.1	Almacenamiento químico y electroquímico	10
1.7.2	Almacenamiento eléctrico y electromagnético	16
1.7.3	Supercondensadores	16
1.8	Sistemas de frenos regenerativos	23
1.8.1	Función del freno regenerativo	23
1.8.2	KERS (Sistema de Recuperación de Energía Cinética)	24
<b>Capítulo II</b>		26
<b>2.</b>	<b>Materiales y métodos</b>	26
2.1	Materiales	26
2.1.1	Motor de cubo sin escobillas 500W	26
2.1.2	Controlador electrónico	27
2.1.3	Acelerador de pulgar	29
2.1.4	Batería de litio de 40V/12.5 Ah	29
2.1.5	Palancas de freno electrónicas	30
2.1.6	Pantalla LED	31
2.1.7	PAS (sensor de asistencia de pedaleo)	31
2.1.8	Módulo de supercondensadores 16V/1.6F	32
2.2	Metodología de la investigación	34
2.2.1	Tipos de investigación	34
2.2.2	Método	35
2.3	Desarrollo de la propuesta	35
2.3.1	Investigación y selección del kit acorde con las características requeridas	38
2.3.2	Estudio y selección de supercondensadores acorde con las características requeridas	54
2.3.3	Diseño de circuito electrónico con supercondensadores	55
2.3.4	Elaboración de circuito electrónico y montaje de supercondensadores	60
2.3.5	Pruebas piloto en banco de funcionamiento del circuito con los supercondensadores	64
2.3.6	Ensamblaje del sistema de propulsión eléctrica con freno regenerativo y supercondensadores	67
2.3.7	Pruebas de funcionamiento del prototipo	68
2.3.8	Pruebas de autonomía a diferentes parámetros	68

<b>Capítulo III</b>	71
<b>3. Resultados y Discusión</b>	71
3.1 Análisis de resultados	71
3.2 Pruebas en autopista Otavalo-Ibarra con propulsión eléctrica sin supercondensadores	71
3.3 Pruebas en autopista Otavalo-Ibarra con propulsión eléctrica y supercondensadores	74
3.4 Análisis de autonomía del sistema de propulsión eléctrico sin supercondensadores y con su aplicación	76
3.4.1 Autonomía con batería de litio sin supercondensadores	77
3.4.2 Autonomía con batería de litio y supercondensadores	78
3.5 Discusión de la autonomía obtenida con el sistema desarrollado	78
<b>Capítulo IV</b>	81
<b>4. Conclusiones y recomendaciones</b>	81
4.1 Conclusiones	81
4.2 Recomendaciones	82
<b>Referencias bibliográficas</b>	83
<b>Anexos</b>	87

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA NÚM.</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>1.1</b> Características batería plomo-ácido	12
<b>1.2</b> Características batería Ni-MH	14
<b>1.3</b> Características batería de Litio-ion	15
<b>1.4</b> Características generales de supercondensadores	18
<b>2.1</b> Características del motor eléctrico	27
<b>2.2</b> Características del controlador electrónico	28
<b>2.3</b> Características de la batería de litio	30
<b>2.4</b> Características del PAS	32
<b>2.5</b> Características del módulo de supercondensadores	33
<b>2.6</b> Coeficientes de rodadura para distintos neumáticos	40
<b>2.7</b> Coeficiente aerodinámico para distintos vehículos	44
<b>2.8</b> Área frontal de la bicicleta	44
<b>2.9</b> Datos de pendientes en la ruta	51
<b>2.10</b> Cálculo de fuerza de impulsión en cada punto	51
<b>2.11</b> Potencia del motor	52
<b>2.12</b> Consumo energético	53
<b>2.13</b> Autonomía	53
<b>2.14</b> Características módulo de supercondensadores	55
<b>2.15</b> Parámetros puente rectificador	57
<b>2.16</b> Cálculos del puente rectificador de diodos	58
<b>2.17</b> Niveles de prestaciones del sistema de propulsión	69
<b>3.1</b> Obtención de datos con propulsión eléctrica sin supercondensadores	72
<b>3.2</b> Obtención de datos con propulsión eléctrica con supercondensadores	75
<b>3.3</b> Resultados de autonomía	77
<b>3.4</b> Aumento de autonomía	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA NÚM.</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>1.1</b> Estructura de un motor eléctrico	5
<b>1.2</b> Control de velocidad	7
<b>1.3</b> Circuito de electromagnetismo	9
<b>1.4</b> Estructura interna batería plomo-ácido	12
<b>1.5</b> Batería Ni-MH	13
<b>1.6</b> Sección transversal batería de iones de litio	15
<b>1.7</b> Tiempo de vida batería vs supercondensador	17
<b>1.8</b> Perfil de carga del supercondensador	19
<b>1.9</b> Perfil de descarga del supercondensador.	19
<b>1.10</b> Proceso de carga y descarga de un polímero conductor	22
<b>1.11</b> McLaren-Mercedes Fórmula 1 (sistema KERS)	24
<b>1.12</b> Funcionamiento del KERS en la fórmula 1	25
<b>2.1</b> Motor de cubo sin escobillas	27
<b>2.2</b> Controlador electrónico	28
<b>2.3</b> Acelerador de pulgar	29
<b>2.4</b> Batería de litio	29
<b>2.5</b> Palancas de freno electrónicas	31
<b>2.6</b> Pantalla led	31
<b>2.7</b> PAS	32
<b>2.8</b> Módulo de supercondensadores	33
<b>2.9</b> Flujograma de la propuesta	37
<b>2.10</b> Diagrama de cuerpo libre de bicicleta	39
<b>2.11</b> Parámetros de determinación de la pendiente	41
<b>2.12</b> Identificación de tramos en la ruta	50
<b>2.13</b> Circuito de carga y descarga de un condensador	56
<b>2.14</b> Generador y puente rectificador	58
<b>2.15</b> Diseño de circuito electrónico	59
<b>2.16</b> Gráficas obtenidas en el programa	59
<b>2.17</b> Flujograma elaboración del circuito electrónico	61

<b>2.18</b>	Conexiones de cables de fase	62
<b>2.19</b>	Puente rectificador	62
<b>2.20</b>	Elaboración del circuito electrónico	63
<b>2.21</b>	Prueba con multímetro	64
<b>2.22</b>	Señal de fase producida por el generador	65
<b>2.23</b>	Señal del sensor PAS	66
<b>2.24</b>	Corriente máxima y mínima de carga	66
<b>2.25</b>	Ensamblaje de los componentes	67
<b>2.26</b>	Ruta de pruebas	68
<b>2.27</b>	Pruebas de funcionamiento	70
<b>3.1</b>	Ruta sin supercondensadores	73
<b>3.2</b>	Ruta con supercondensadores	76
<b>3.3</b>	Autonomía sin supercondensadores	77
<b>3.4</b>	Autonomía con supercondensadores	78
<b>3.5</b>	Comparación de autonomía	79

## ÍNDICE DE ECUACIONES

### ECUACIÓN

<b>NUM.</b>	<b>PÁGINA</b>
2.1 Resistencia a la rodadura	40
2.2 Inclinación porcentual de pendiente	41
2.3 Ángulo de inclinación	42
2.4 Resistencia gravitatoria	42
2.5 Resistencia aerodinámica	43
2.6 Densidad de aire	45
2.7 Velocidad final	45
2.8 Resistencia por aceleración	46
2.9 Resistencia total	46
2.10 Potencia requerida del motor	47
2.11 Potencia del motor	47
2.12 Consumo energético	48
2.13 Autonomía	48
2.14 Voltaje soportado por módulo de supercondensadores	54
2.15 Capacidad total de supercondensadores (conexión en serie)	54
2.16 Voltaje DC máxima de rectificación	57
2.17 Voltaje pulsante DC de rectificación	57
2.18 Voltaje directo DC	58

## ÍNDICE DE ANEXOS

### ANEXO

#### NUM.

#### PÁGINA

1 Datasheet del supercondensador	88
2 Mediciones con elementos apropiados	89
3 Aplicación móvil para registro de datos	90

## RESUMEN

El presente documento de investigación tiene como finalidad realizar el desarrollo de un sistema electrónico para la autonomía en bicicletas eléctricas con freno regenerativo a base de supercondensadores que, mediante una funcionalidad híbrida entre la batería y los supercondensadores permita mejorar el almacenamiento energético y elevar el desempeño de una batería de litio. Actualmente la tecnología se encuentra inmersa en todo campo y la industria automotriz no se encuentra exenta, por lo que el desarrollo de este sistema electrónico pertenece a un medio de transporte alternativo, amigable con la naturaleza y enfocado en mantener una movilidad sostenible. Por lo tanto, se procedió a diseñar el circuito electrónico por medio de un software denominado “Proteus” el cual permitió realizar las simulaciones de funcionamiento del prototipo, posteriormente se llevó a cabo la elaboración de este, antes de ser armados todos los elementos se verificó el funcionamiento del circuito diseñado en un banco de pruebas con la ayuda de distintos elementos de medición (osciloscopio, multímetro, amperímetro). Se realizó el montaje de todos los componentes de la bicicleta eléctrica y adicionalmente el circuito electrónico ya elaborado, ubicados en el cuadro y manubrio de tal manera que realicen su trabajo con normalidad. Se asignó una ruta de recorrido para la ejecución de las pruebas de autonomía, carga y descarga del sistema elaborado. Se realizaron las pruebas de funcionamiento a distintos parámetros y con cada nivel de potencia del motor, considerando el nivel 3, 4 y 5 para la toma de datos. Los resultados de autonomía del funcionamiento híbrido entre supercondensadores y batería fueron registrados de manera porcentual, obteniendo resultados positivos que se encuentran detallados por medio de gráficas y tablas.

## **ABSTRACT**

The purpose of this research paper is to develop an electronic system for the autonomy of electric bicycles with regenerative braking based on supercapacitors that, through a hybrid functionality between the battery and the supercapacitors, allows improving the energy storage and increasing the performance of a lithium battery. Currently, technology is immersed in every field and the automotive industry is not exempt, so the development of this electronic system belongs to an alternative means of transportation, friendly with nature and focused on maintaining a sustainable mobility. Therefore, we proceeded to design the electronic circuit by means of a software called "Proteus" which allowed us to simulate the operation of the prototype, then we carried out the development of this, before being assembled all the elements, the operation of the designed circuit was verified in a test bench with the help of different measuring elements (oscilloscope, multimeter, ammeter). All the components of the electric bicycle were assembled and additionally the electronic circuit already elaborated, located in the frame and handlebars in such a way that they work normally. A route was assigned for the execution of the tests of autonomy, loading and unloading of the elaborated system. The operation tests were carried out at different parameters and with each engine power level, considering level 3, 4 and 5 for data collection. The autonomy results of the hybrid operation between supercapacitors and battery were recorded as a percentage, obtaining positive results that are detailed by means of graphs and tables.

## INTRODUCCIÓN

El avance de la tecnología ha aportado mucho al área automotriz, en la actualidad se busca mejorar las alternativas para la propulsión de vehículos, de esta manera se han desarrollado autos híbridos y eléctricos, usando baterías de iones de litio para el almacenamiento de energía. Pero la capacidad de estos acumuladores ha sido fuertemente cuestionada frente a los requerimientos que deben cumplir (Kazimierski & Kazimierski, 2018) para lograr superar o igualar la autonomía de cualquier vehículo de combustión. Con el propósito de conseguir los resultados deseados con esta nueva forma de movilidad, muchas empresas interesadas han invertido grandes sumas de dinero para el desarrollo de baterías más eficientes y con mayor autonomía (Kazimierski & Kazimierski, 2018).

El uso de la electricidad como fuente de energía alternativa para la propulsión de vehículos, elimina completamente las emisiones contaminantes y disminuye los ruidos (Kazimierski & Kazimierski, 2018), presentando una solución a los problemas medioambientales ocasionados por los residuos resultantes del trabajo de los motores térmicos. Según Kazimierski & Kazimierski (2018) indica que la industria de las bicicletas eléctricas es un sector clave que promueve la producción de baterías, con el aumento de la autonomía de los acumuladores la aplicación podría extenderse a vehículos más grandes.

Los autos eléctricos no son una invención de la actualidad, estos fueron los primeros vehículos que aparecieron, pero las ventajas que presentaban los motores a combustión los rezagaron en la industria. Afortunadamente los sistemas de tracción eléctrica siguieron desarrollándose en aplicaciones fuera del área automotriz (Heuberger et al., 2020), con el avance tecnológico aparecieron las bicicletas eléctricas (EB), mostrando una forma fiable de transportarse. Las primeras versiones de EB se produjeron en la década de 1890 (Hung & Lim, 2020), en los años siguientes se siguieron desarrollando investigaciones que mejoraron sus prestaciones, los nuevos desarrollos presentaban mayor eficiencia y reducción de peso.

Al presentarse los problemas con la autonomía de las baterías de vehículos eléctricos y conociendo que esta causa dificulta el total reemplazo de los autos con motor de combustión, mediante esta investigación se propone el desarrollo de un sistema híbrido de

almacenamiento mediante el uso de supercondensadores conectados con la batería de litio, se mejora la autonomía y capacidad de carga de la batería utilizada en una bicicleta eléctrica.

Actualmente el aporte de la tecnología es un pilar fundamental dentro de cualquier campo, la aplicación de los supercondensadores en vehículos eléctricos forma parte de las alternativas adoptadas frente a los retos que se tiene dentro de la industria automotriz. Las baterías empleadas en la automoción tienen una evolución frecuente mejorando sus características y al aprovechar las ventajas de los supercondensadores se logra optimizar las prestaciones del vehículo eléctrico.

Como todo dispositivo electrónico tiene sus beneficios y limitaciones, los supercondensadores no son la excepción por lo que sus ventajas y desventajas son analizadas prioritariamente antes de emplear estos elementos en cualquier sistema; sin embargo, el desempeño que brindan hoy en día los hace capaces de poder ser utilizados en la automoción, ya que gracias a sus ventajas se puede mejorar el desempeño de aspectos como: potencia, eficiencia, vida útil, resistencia a elevadas temperaturas, entre otras.

Pese a las características aceptables de los supercondensadores también tiene limitaciones, por lo que hoy en día son empleados en combinación con las baterías eléctricas. Esta hibridación eleva características de rendimiento de la batería y el desempeño del vehículo eléctrico.

# CAPÍTULO I

## 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 OBJETIVOS

#### 1.1.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un sistema electrónico para la autonomía en bicicletas eléctricas con freno regenerativo a base de supercondensadores.

#### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar y construir un circuito electrónico a base de un módulo de supercondensadores con el propósito de mejorar el almacenamiento de energía en la batería.
2. Implementar un sistema de freno regenerativo con la aplicación de supercondensadores para aumentar el desempeño de una batería de litio.
3. Establecer un análisis comparativo de la autonomía y carga del sistema de freno regenerativo con supercondensadores y sin supercondensadores.

### 1.2 JUSTIFICACIÓN

La implementación del freno regenerativo es una idea que se está utilizando en los vehículos eléctricos, esta función permite aprovechar la energía que se podría perder durante el frenado del vehículo, así se obtiene corriente que puede alimentar al acumulador y después ser

aprovechada por el mismo vehículo, para esto es necesario que la batería sea eficiente y aporte la autonomía adecuada para realizar viajes extensos.

Las fuentes de almacenamiento se han ido desarrollando con el tiempo, así tenemos la batería de plomo que normalmente se usa en los vehículos a combustión, luego con la aparición de los vehículos híbridos se ha desarrollado la batería de litio que presenta mejoras en su forma de almacenar. El aumento de temperatura que se produce durante el funcionamiento de estas baterías tiene como consecuencia la reducción del tiempo de vida útil y la autonomía de carga.

Una alternativa que presenta el proyecto ante este problema es el almacenamiento de energía mediante la aplicación de un sistema electrónico, que incluye supercondensadores los cuales permitirán extender la autonomía de las baterías de litio, incluso presentan una rápida respuesta a la carga y descarga, sin tener problemas con el aumento de la temperatura. Así también el tiempo que se necesita para cargar un supercondensador es menor al de una batería que se usa normalmente en la movilidad eléctrica, lo que en conjunto permitiría un mejor desempeño para la propulsión en vehículos eléctricos. Si se toman las mejores características de estos dispositivos de almacenamiento y se usan para solucionar los inconvenientes que poseen, se podría llegar a incrementar la autonomía en vehículos eléctricos y aprovechar de mejor manera la energía.

De esta manera, se cumple con los objetivos planteados en el Plan Nacional Para El Buen Vivir (SENPLADES, 2017). En el eje 1 correspondiente a derechos para todos durante toda la vida, se cumple con el objetivo 3 el cual indica que se debe: garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones, así se limita la contaminación al medio ambiente, ya que el resultado de las emisiones de los motores de combustión forma parte de esta problemática. De la misma manera se cumple con el eje 2, objetivo 5 el cual señala que se debe: impulsar la productividad y competitividad para el crecimiento económico sustentable de manera redistributiva y solidaria, prácticamente se trabaja en el cambio de la matriz productiva, promoviendo alternativas en la movilidad y el uso de mejores fuentes energéticas, para mejorar el patrón de producción que ha manejado normalmente el país.

### **1.3 ALCANCE**

El desarrollo de esta investigación busca mejorar la autonomía de las baterías de litio implementando elementos alternativos para almacenamiento de energía, en este caso se utilizarán supercondensadores. El proyecto iniciará con el diseño del sistema en el software denominado “Proteus”.

La investigación planteada se enfoca en diseñar y analizar un circuito que permita el aprovechamiento de la energía producida por un generador CA, así como comprender el comportamiento de un sistema híbrido de almacenamiento de energía eléctrica. Esta es la razón por la cual se adquirirá y utilizará un kit para bicicletas eléctricas ya que posee la acción de freno regenerativo y puede ser aprovechada la energía producida durante su funcionamiento.

El resultado del circuito elaborado y el kit para bicicletas eléctricas se ensamblarán en una bicicleta que servirá como base para analizar el funcionamiento del proyecto. Los datos serán evaluados luego de realizar pruebas de desempeño de la autonomía en ruta con la intervención del componente y otras sin su empleo.

### **1.4 ANTECEDENTES**

El primer auto eléctrico fue presentado en 1830 (Vargas Fabre, 2012) alcanzando los 100 km/h, dando paso a la comercialización de los mismos a finales del siglo XIX (Rodríguez, 2013). Con esto se trató de iniciar una nueva evolución en la industria automotriz, pero decreció la utilización de estos vehículos debido a la aparición del petróleo y el masivo uso de motores de combustión interna, siendo hasta la actualidad la fuente de combustible más empleada. El petróleo presentó varias ventajas en el funcionamiento de los motores de combustión interna, entre ellas: el desarrollo de partidores (distribuidores), los bajos precios del petróleo, la facilidad de suministro y facilidad de carga. A inicios del siglo XX se incrementó la importancia de desarrollar la movilidad eléctrica (Adamec et al., 2019), con el fin de incrementar los partidores de los automóviles de combustión interna.

Afortunadamente los sistemas de tracción eléctrica siguieron desarrollándose en aplicaciones fuera del área automotriz (Heuberger et al., 2020) debido a que sus campos de desarrollo para ese entonces fueron la industria y electrónica de potencia, con la finalidad de incrementar la eficiencia, además de controlar la velocidad y torque en motores. La tracción eléctrica también fue de amplia utilización en el desarrollo de trenes y buses con motores eléctricos (Iacobucci et al., 2019) conectados a una red para su funcionamiento, pero al no constar con un sistema adecuado de almacenamiento de energía fue imposible competir con los vehículos de combustión interna.

Gracias al avance tecnológico, las bicicletas eléctricas (EB) fueron apareciendo como una modalidad de transporte. Las primeras versiones de EB se produjeron en la década de 1890 (Hung & Lim, 2020). En 1985, Ogden Bolton invento un prototipo de bicicleta eléctrica que integraba un solo motor con corriente continua de seis polos que iba montado en la rueda trasera, el motor tenía la capacidad de trabajar con corrientes de alta intensidad a bajos voltajes. Un año posterior a ello, Charles Theryc fue el encargado de inventar una especie de cubo de motor eléctrico el cual era adaptado en bicicletas eléctricas debido a su elevada eficiencia.

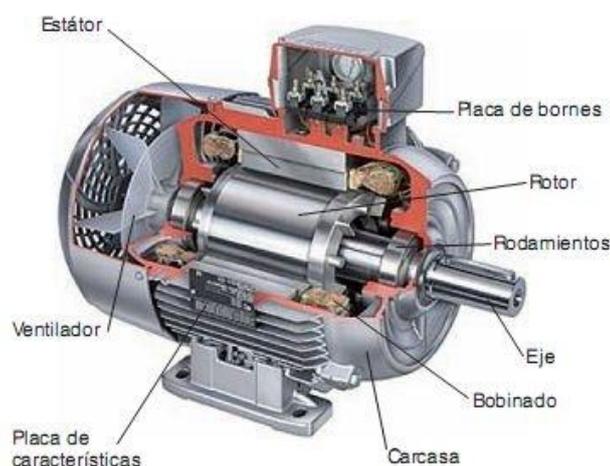
Los avances en esta tecnología y su aplicación tenía un desempeño considerable, por lo que varios inventores desarrollaron y realizaron pruebas pertinentes al caso; alrededor de los años 1900 hasta 1990, y con base a varias patentes existentes; Albert Hansen fue el encargado de inventar una bicicleta eléctrica que utilizaba un motor sin buje en su centro; por lo tanto, el cuadro utilizado constaba de una disposición de elementos adecuados para poder ubicar los componentes que constituyen al sistema de EB.

Grupos de investigadores se encargaron de adaptar sistemas adicionales de acuerdo con las necesidades de los usuarios, por lo cual la tecnología jugaba un papel importante dentro del desarrollo de bicicletas eléctricas. Utilizaban sensores, distintos mecanismos y controladores para efectuar las acciones mencionadas, logrando una elevada eficiencia en temas de transmisión y buscando siempre la reducción de peso, además lograba una cierta elevación en la salida de potencia gracias a los cambios y sistemas aplicados; los resultados se ven implicados en la salud de los usuarios (Jones et al., 2016) mejorando el bienestar y la movilidad.

## 1.5 SISTEMA DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA

### 1.5.1 MOTORES ELÉCTRICOS

El motor eléctrico es una máquina rotatoria que transforma la energía eléctrica en energía mecánica, su eficiencia es alta en comparación con un motor térmico (McGraw, 2011), también presentan un funcionamiento más limpio, no producen emisiones contaminantes y son silenciosos.



**Figura 1.1** Estructura de un motor eléctrico

(Zeballos, n.d. 2011, pág. 289)

### 1.5.2 TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS

Existen varios modelos de motores eléctricos y se pueden clasificar según el tipo de energía que utilizan para su accionamiento.

Motor de corriente alterna CA, su uso es muy amplio en el área industrial y se dividen como se muestra a continuación:

- Por su velocidad de giro, pudiendo ser asíncronos cuando la velocidad con la que gira el campo magnético en el estator es superior a la del giro del rotor, o síncronos cuando el giro del campo magnético y el rotor son similares.

- Por el número de fases de alimentación, pudiendo ser monofásicas o trifásicas.

Motor de corriente continua CC, son motores más precisos y utilizados en vehículos pequeños para el accionamiento de componentes.

Este tipo de motores tienen la particularidad de realizar su trabajo de manera inversa, eso quiere decir que no solo son usados para alimentarse de energía eléctrica y transformarla en mecánica, sino que además pueden trabajar como generadores de energía, esto los hace diferentes a los motores de CA (corriente alterna).

Los motores de CC (corriente continua) tienen su particularidad de desarrollar un par de arranque alto, en comparación con uno de corriente alterna, incluso se puede controlar con mayor facilidad su velocidad de trabajo (Bueno, 2014), esto se consigue al variar su voltaje de alimentación. De esta manera se destacan por su uso en vehículos o maquinarias que necesitan control de velocidad.

El motor de corriente continua sin escobillas brushless es uno de los más utilizados en la propulsión de vehículos eléctricos livianos. Consta de imanes permanentes en el rotor y en la parte del estator se encuentra incorporado el embobinado. Como menciona (Cuesta, 2017), en estos motores alimentados con CC se elimina la necesidad de escobillas y el rozamiento permanente con la pieza en movimiento.

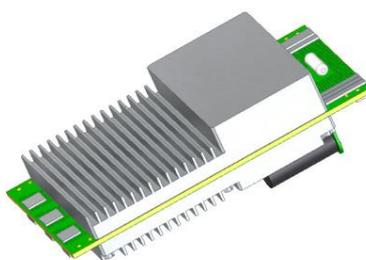
## **1.6 CONTROL ELECTRÓNICO**

### **1.6.1 CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA**

El motor de CD es uno de los actuadores eléctricos de más amplio uso, esto debido a sus diferentes tamaños de construcción y fácil aplicación, así también presentan facilidad para su control y utilización (Betancour et al., 2018). Para conocer la posición en la que se encuentra trabajando el rotor y su respectiva velocidad se usan sensores.

La velocidad puede ser mayor o menor dependiendo del flujo de corriente que pasa por los polos, a mayor paso de corriente la velocidad aumenta y a menor paso de corriente la velocidad se reduce.

El controlador de velocidad del motor de CD permite modificar los niveles de velocidad a los cuales puede funcionar el motor eléctrico, así también trabaja como un freno dinámico, esto lo realiza al permitir el retorno de la energía desde el motor hacia un suministro.



**Figura 1.2** Control de velocidad

(Cerpa Bernal et al., 2016,pág.49)

## 1.6.2 SENSORES

### ➤ **Importancia**

Los diversos tipos de sensores existentes en la actualidad se han convertido en elementos importantes para realizar mediciones de diferentes variables que aparecen en un proceso y asegurar su adecuado control. Los cambios detectados por los sensores se envían como señales hacia un procesador.

### ➤ **Tipos de señales de salida**

Para comprender los resultados proporcionados por un sensor es necesario conocer sus señales de respuesta.

Señal digital: Son señales binarias, que representan dos estados “On” y “Off”, dependiendo si el sistema se encuentra activado o desconectado (Ebel & Nestel, 1993). Estas señales pueden ser procesadas por un computador.

Señal análoga: Comúnmente generada por algún tipo de fenómeno electromagnético. Presenta una gráfica continua en la que puede variar su amplitud y periodo de acuerdo con el tiempo (Ilatoma, 2017).

➤ **Tipos de sensores según su estructura interna**

Pasivos: No necesariamente necesitan de una fuente de alimentación, estos sensores cambian sus valores con la variación de la luz o temperatura.

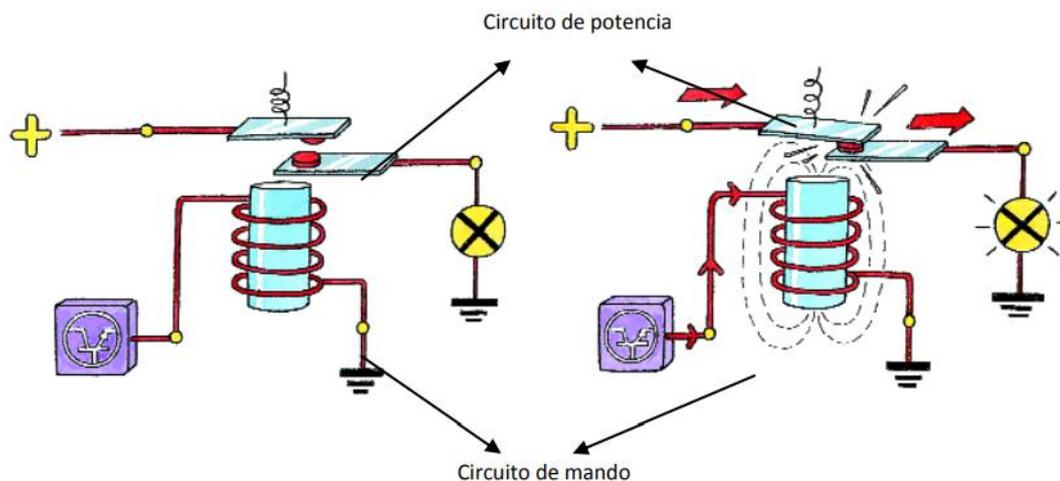
Activos: Para que su señal sea producida y entendida por un circuito electrónico, necesitan de una fuente de alimentación.

### **1.6.3 ACTUADORES**

➤ **Clasificación de los actuadores**

- **Electromagnéticos**

Son elementos accionados mediante la inducción electromagnética o por un imán, entre los cuales encontramos los relés, basados en el efecto electroimán, producido por una bobina enrollada alrededor de un núcleo de hierro en la cual circula corriente, este dispositivo permite controlar el paso de corrientes elevadas, mediante una pequeña señal de activación.



**Figura 1.3** Circuito de electromagnetismo

(Guarella et al., 2011,pág.19)

- **Electromotores**

Convierten la energía eléctrica en energía mecánica de rotación, al circular la corriente por un bobinado estático se produce un campo magnético, si se coloca otro bobinado rotatorio dentro, la fuerza generada en el estator obliga a que el campo móvil gire.

- **Actuador paso a paso**

Es un convertidor electromecánico, recibe información en forma de energía eléctrica y produce un trabajo mecánico sobre una determinada posición. Está constituido por un estator cuyos devanados se llaman fases y un rotor con elevado número de polos (Aragón, 2014).

## 1.7 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

### 1.7.1 ALMACENAMIENTO QUÍMICO Y ELECTROQUÍMICO

#### ➤ **Baterías**

Suponen actualmente la principal forma de almacenamiento a pequeña escala (Chicharro, 2016), pero en los últimos años han tenido varias aplicaciones a gran escala.

Las baterías son células recargables que almacenan y devuelven energía eléctrica gracias a reacciones químicas en su interior (Chicharro, 2016), los investigadores buscan mejorar los procesos de reacciones químicas y que presenten un mayor tiempo de vida.

Dentro de esta categoría encontramos las baterías de plomo ácido, níquel-hidruro metálico y las de iones de litio que presentan gran potencial electroquímico, por lo cual son utilizadas en el área automotriz; los procesos de carga y descarga, en la mayoría de los casos, incrementa la temperatura por lo que resulta necesario una adecuada refrigeración (Lyu et al., 2019). Las baterías juegan un rol indispensable en aspectos referentes a la autonomía del vehículo y su evolución es constante buscando las mejores alternativas de producción para incrementar los beneficios.

#### **Características de las baterías:**

- **Capacidad.**

Esta característica se deriva del nivel de descarga que puede tener una batería. Se mide en amperios hora (Ah), es el resultado de multiplicar la cantidad de corriente constante entregada y el tiempo que se demora en descargarse la batería desde el valor inicial de 100% hasta un nivel de energía de 20%.

- **Profundidad de descarga (DOD)**

Este parámetro representa la cantidad de energía que es posible aprovechar de una batería. Es decir, la cantidad de energía efectiva que se puede extraer con relación a la energía total presente en el acumulador. Como menciona Pérez (2016) el DOD en baterías es de máximo 80%.

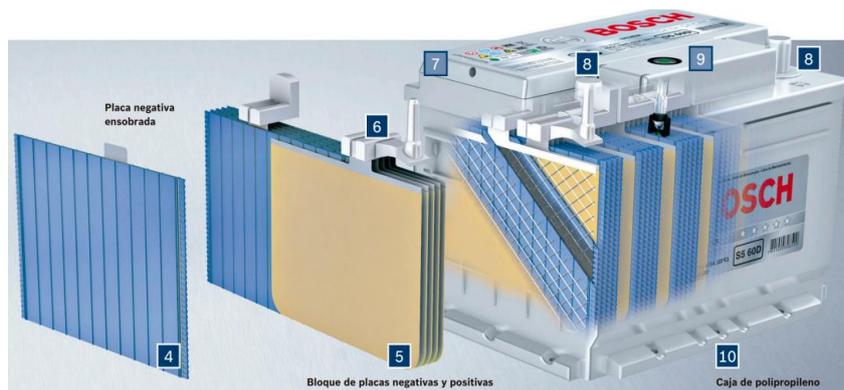
- **Tensión de salida**

La tensión de las baterías no permanece constante durante el proceso de carga o descarga (Pérez, 2016). Este parámetro está determinado por el estado de carga (SOC) y la temperatura del electrolito como resultado del proceso realizado por el acumulador.

- **Batería de Plomo-Ácido**

Estas baterías son muy utilizadas en los automóviles, debido a que pueden producir una corriente suficiente para el arranque del motor de combustión y la alimentación de diversos componentes eléctricos y electrónicos, contienen celdas de 2V cada una, al conectarlas en serie se consiguen elaborar acumuladores de 6V y 12V.

Como se muestra en la figura 1.4, esta batería se encuentra formada por dos electrodos de plomo de distinto tipo, la placa negativa es de plomo esponjoso y la positiva está formada por dióxido de plomo, están separadas por un aislante para evitar el contacto entre ellas; todo el conjunto se sumerge en un electrolito de ácido sulfúrico disuelto en agua.



**Figura 1.4** Estructura interna batería plomo-ácido

(Catálogo de Aplicaciones Baterías Bosch, n.d., pág.5)

Como señala H. Romero (2016) estas baterías alcanzan un rendimiento del 80%, con un estado mínimo de carga del 20%. El precio de adquisición suele ser de 400 USD/kWh, mientras que su precio de operación y mantenimiento se encuentra entre los 2.35 USD/kWh. En la tabla 1.1 se detallan las características más relevantes de la batería de plomo-ácido.

**Tabla 1.1** Características batería plomo-ácido

Característica	Valor
Densidad de energía	60-180 Wh/kg
Rango de energía	$144 \cdot 10^3$ MJ
Rango de potencia	0.1-10 MW
Ciclos de carga/descarga	500-700 ciclos
Eficiencia	80%
Mínimo estado de carga	20%
Coste de instalación	400 USD/kWh

**Elaborado por:** Los autores

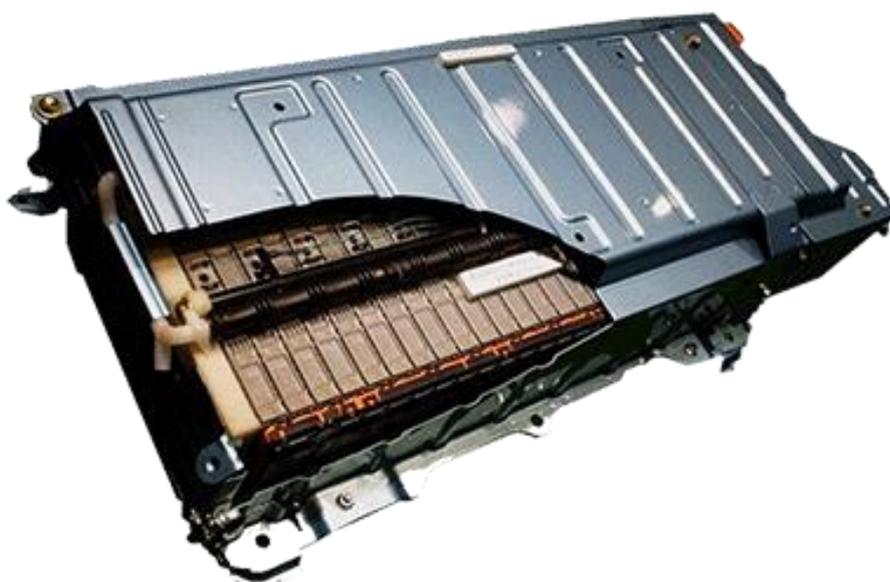
**Fuente:** (Romero, 2016, pág.50)

➤ **Batería de níquel – hidruro metálico**

Estas baterías permiten realizar cargas rápidas y poseen una larga vida útil, por lo cual han sido los acumuladores más utilizados en vehículos híbridos y eléctricos, así como en diferentes dispositivos electrónicos como computadoras y celulares.

De acuerdo con J. Martínez (2017) menciona que el voltaje por celda suele encontrarse hasta 1.5 V, la densidad de energía ronda entre 60 hasta 120 Wh/kg, durante su vida útil puede alcanzar de 500 a 800 ciclos de carga y descarga.

La estructura básica de una batería de Ni-MH se encuentra formada como menciona Yattah (2015) consiste de una placa positiva de oxihidróxido de Níquel, la placa negativa está compuesta por aleaciones capaces de absorber hidrógeno (MH) y un electrolito alcalino. En la figura 1.5 se observa una batería de Ni-MH utilizada en el Toyota Prius.



**Figura 1.5** Batería Ni-MH

([www.bateriasmadrid.com](http://www.bateriasmadrid.com))

En la tabla 1.2 se observan las principales características de esta batería. Como particularidades de la batería Ni-MH al ser selladas no requieren de mantenimiento, pueden realizarse cargas rápidas, moderada autodescarga y poco efecto memoria.

**Tabla 1.2** Características batería Ni-MH

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Densidad de energía (Wh/kg)	60-120
Potencia de celda (V)	1.5
Ciclos de vida	300-1000
Autodescarga (% mensual) a T° ambiente	20-30

**Elaborado por:** Los autores

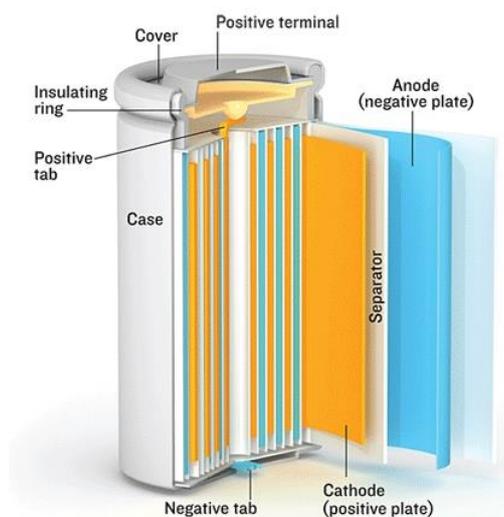
**Fuente:** (Yattah, 2015)

### ➤ **Batería de litio**

Son baterías que están compuestas con materiales que poseen un gran potencial químico, lo que permite fabricar acumuladores de gran capacidad y con peso reducido. Gracias a sus características se ha convertido en el componente más importante del vehículo eléctrico e híbrido. En la actualidad se siguen realizando investigaciones buscando más potencial en el acumulador de iones de litio.

Según J. Martínez (2017) señala que la densidad de energía proporcionada por esta batería es más del doble que una de Ni-MH. El voltaje por celda se encuentra entre 3.3 y 3.7 V, lo cual hace posible el uso de baterías de una sola celda en celulares. Tiene una autodescarga muy baja y no requiere de mantenimiento.

En la figura 1.6 se observa la sección transversal de una batería de litio-ion, donde se puede apreciar la estructura interna y sus partes principales.



**Figura 1.6** Sección transversal batería de iones de litio

([www.forococheselectricos.com](http://www.forococheselectricos.com))

Las características que presentan las baterías de Litio-ion son las que se muestran en la tabla 1.3.

**Tabla 1.3** Características batería de Litio-ion

Característica	Valor
Densidad de energía	300-400 Wh/kg
Rango de energía	$36 \cdot 10^3$ MJ
Rango de potencia	0.1-10 MW
Rendimiento	94%
Ciclo de carga/descarga	4500 ciclos
Mínimo estado de carga	10%
Coste de instalación	600 USD/kWh

**Elaborado por:** Los autores

**Fuente:** (Romero, 2016, pág.48)

Estas baterías necesitan incorporar un circuito interno para protección en situaciones de sobrecarga y un empaquetamiento especial, lo que se ve reflejado en su precio de comercialización.

## 1.7.2 ALMACENAMIENTO ELÉCTRICO Y ELECTROMAGNÉTICO

### 1.7.3 SUPERCONDENSADORES

#### ➤ **Definición**

El supercondensador es un dispositivo electroquímico capaz de aportar una densidad de energía muy elevada, sin tener como consecuencia la reducción de potencia (Yan et al., 2017), la notable diferencia con los condensadores convencionales se encuentra en su capacidad de almacenamiento de carga, ya que trabajan en rangos de microfaradios, mientras que los supercondensadores tienen niveles de capacidad en faradios o incluso kilo faradios. Su forma de almacenamiento se realiza en medio de sus laminillas y por la acción del medio aislante.

#### ➤ **Beneficios**

Los supercondensadores almacenan energía mediante el fenómeno de la pseudocapacitancia, depende directamente de la manera en la que se manejan las tensiones que aparecen en el circuito, permitiendo regular los niveles de capacitancia del supercondensador.

La capacitancia de un supercondensador es de un valor alto y es posible manejarlo como un condensador tradicional, mediante el empleo de resistencias y bobinas (Yan et al., 2017), de esta manera se controla la cantidad de carga que puede almacenar y la que va a entregar al circuito.

#### ➤ **Capacidad de carga**

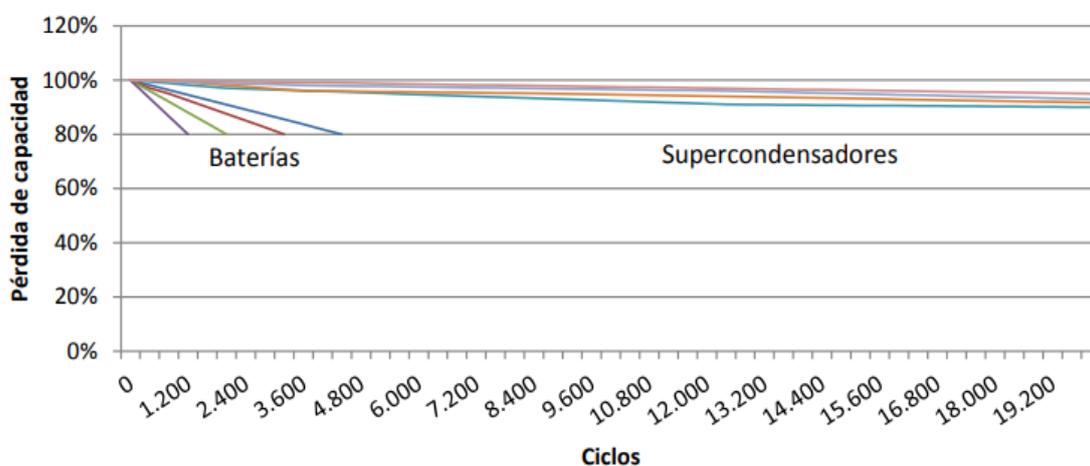
Los supercondensadores tienen una velocidad de carga más rápida, pueden oscilar entre 1 y 10 segundos, cuando un supercondensador está totalmente vacío tiende a succionar toda la corriente de entrada, por lo que es necesario colocar protecciones en el sistema (Yan et al., 2017), su velocidad de carga es mucho más rápida que una batería común.

Los supercondensadores no presentan problemas de sobrecarga, la intensidad de corriente producida por el generador dejará de entrar cuando ya esté totalmente lleno el supercondensador, de esta manera se puede evitar el uso de un sistema para controlar el nivel de carga en los supercondensadores.

Entregan un bajo voltaje de salida, para solucionar este inconveniente se suman las tensiones individuales, realizando conexiones en serie (Chicharro, 2016), de esta manera se alcanza los niveles deseados en el circuito.

### ➤ Tiempo de vida

Los supercondensadores presentan una esperanza de vida mucho mayor que las baterías (Yan et al., 2017), esto gracias a que en su proceso de almacenamiento no intervienen cambios químicos en su interior. Así también se tiene que el número de ciclos de carga y descarga del supercondensador son mayores que los de la batería, la intensidad de carga se limita por el mismo supercondensador, evitando niveles altos de temperatura y disminuye el desgaste por funcionamiento de sus componentes. En la figura 1.7 se muestra la comparación del tiempo de vida en ciclos de carga y descarga de los supercondensadores con respecto a las baterías.



**Figura 1.7** Tiempo de vida batería vs supercondensador

(Pérez, 2016, pág.90)

Pueden ser colocados en lugares inaccesibles, porque su tiempo de vida será superior al del mecanismo que alimenta. En comparación con las baterías normalmente utilizadas, los supercondensadores son mucho más pequeños y menos pesados manteniendo la misma capacidad de carga.

### ➤ Características

Las características generales que presentan los supercondensadores se muestran en la tabla 1.4.

**Tabla 1.4** Características generales de supercondensadores

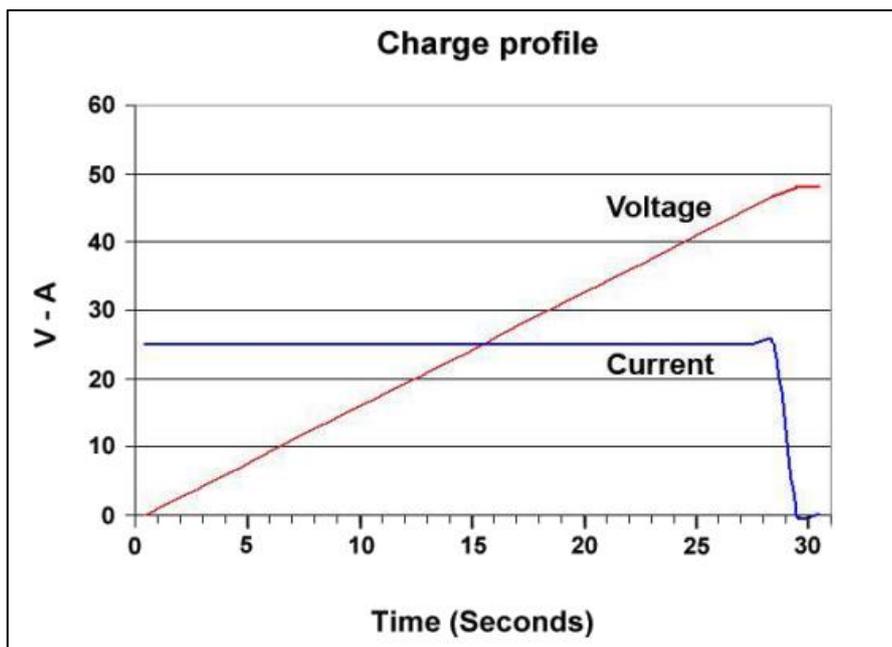
<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Capacidad (F)	1-5000
Densidad de energía (Wh/kg)	1-10
Densidad de potencia (kW/kg)	1-10
Tiempo de carga (seg.)	0,1-30
Ciclos de carga y descarga	>500.000
Rendimiento eléctrico (%)	95-99

**Elaborado por:** Los autores

**Fuente:** (Pérez, 2016)

- **Curvas de carga y descarga**

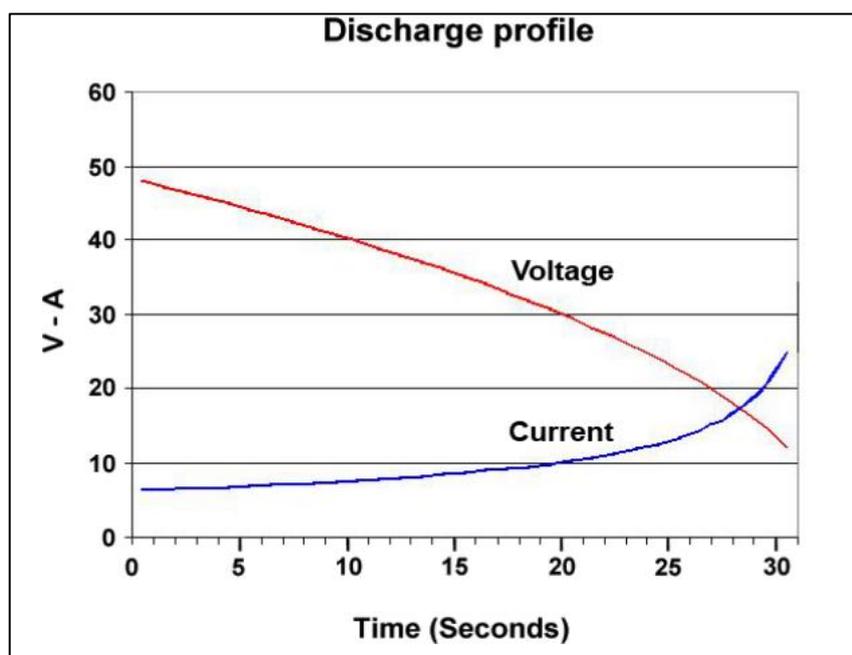
Como se puede observar en la figura 1.8 el voltaje aumenta linealmente durante la carga, mientras que la intensidad sufre una caída repentina hasta cero voltios al llenarse el supercondensador.



**Figura 1.8** Perfil de carga del supercondensador

(Pérez, 2016, pág.65)

En la figura 1.9 se muestra como la tensión disminuye linealmente al descargarse el supercondensador. Pérez (2016) menciona que, en el caso de utilizar un regulador de tensión ideal, se consigue aumentar la intensidad mientras el voltaje va cayendo, esto permite mantener un nivel de potencia eléctrica constante.



**Figura 1.9** Perfil de descarga del supercondensador.

(Pérez, 2016, pág.66)

- **Tensión de funcionamiento**

Un supercondensador se carga al aplicarle una tensión definida, para que funcione de manera segura este voltaje máximo debe encontrarse dentro de los límites marcados por el fabricante. Esto es debido a que al sobrepasar los niveles máximos se produce la descomposición del material electrolito.

- **Estado de carga (SOC)**

Especifica la capacidad disponible en el dispositivo de almacenamiento, con respecto a su capacidad nominal (Pérez, 2016). Cuando el SOC es igual a 0% quiere decir que el acumulador está vacío y cuando es de 100% está lleno.

- **Profundidad de descarga (DOD)**

Muestra la cantidad de energía que es posible extraer del supercondensador y se encuentra representado en porcentaje, el valor de 0% indica que no se ha realizado descarga y el 100% que el dispositivo está vacío.

- **Tipos de supercondensadores**

La clasificación de estos componentes ha evolucionado constantemente gracias a la aplicación de distintos materiales empleados en su fabricación. Se derivan varios tipos que se describen a continuación:

- **Supercondensador electrolítico de entre caras de carbono de doble capa**

Los componentes empleados en su fabricación son el ácido sulfúrico o el hidróxido de sodio-potasio, en este componente se tiene la capacidad de almacenar una cantidad más elevada de energía eléctrica producida por el aumento existente en el potencial debido a la atracción que se produce entre caras.

- **Supercondensadores no electrolíticos de entre caras de carbono de doble capa**

Su elaboración se basa en nanotubos de carbón, elementos aerogeles, carbón activo y soles, se utiliza en gran cantidad el carbono debido a que es un material comúnmente utilizado en el medio y de un reducido costo, además, ofrece una capacidad de trabajo con un área más amplia.

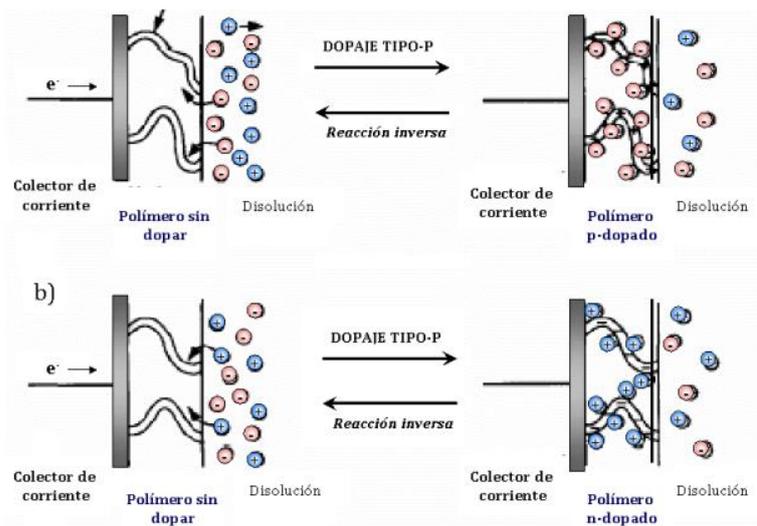
El supercondensador de electrodos de nanotubos de carbón es el más ventajoso, debido a que contiene una sólida capa con nano escala de un material dieléctrico de óxido que básicamente sustituye por completo a los electrolitos.

- **Supercondensadores acuosos de óxido de doble capa con pseudocapacitancia redox**

Los electrodos de óxido de metal son muy importantes en dispositivos de almacenamiento eléctrico (Salcedo et al., 2014). Resultan de un proceso de fabricación termoquímicamente estable, y el empleo de la capacitancia en una solución acuosa va a depender generalmente de la dispersión o separación de los cristalitos de óxido.

- **Supercondensadores basados en polímeros conductores**

Los materiales que se encuentran inmersos en la fabricación de estos supercondensadores son polianilina, poliacetileno, polipirrol, entre otros; pueden generar gran capacidad de conducción eléctrica y su proceso de oxidación depende de la inyección de electrones. El proceso de almacenamiento de energía se puede apreciar en la figura 1.10 que se indica a continuación:



**Figura 1.10** Proceso de carga y descarga de un polímero conductor

(Pérez, 2016, pág.53)

- **Supercondensadores híbridos**

Su composición se basa en un electrodo microporoso de carbono y con un electrodo definido de un material denominado pseudocapacitivo. Este elemento tiene características tanto de carga y descarga similares a las de un condensador de doble capa y cualidades similares a una batería. La densidad energética en uno de sus electrodos es mayor a la de los supercondensadores de doble capa, pero la potencia no aumenta de manera proporcional con el aumento de la densidad energética.

- **Utilización**

El empleo de supercondensadores a nivel general es variado dependiendo de diversos factores en los que es conveniente su aplicación. Gracias a las enormes ventajas que presentan como: la capacidad de trabajar con altos voltajes, elevada eficiencia de utilización, trabajar con altas temperaturas, ciclos más largos de funcionamiento han hecho que los supercondensadores sean elementos capaces de trabajar en varios campos.

Se utilizan en vehículos híbridos debido a su característica de carga rápida, permitiendo aprovechar la energía generada por el freno regenerativo y por su gran cantidad de ciclos de carga y descarga lo que permite tener una larga vida útil.

## **1.8 SISTEMAS DE FRENO REGENERATIVOS**

El denominado sistema de freno regenerativo consiste en un método factible para conseguir energía, en este caso se encarga de recargar las baterías de los vehículos eléctricos o también ayuda al ahorro de combustible en los vehículos híbridos. Durante la acción de frenado el sistema se encarga de convertir la energía cinética en energía eléctrica y posteriormente ser almacenada en las baterías de los vehículos.

### **1.8.1 FUNCIÓN DEL FRENO REGENERATIVO**

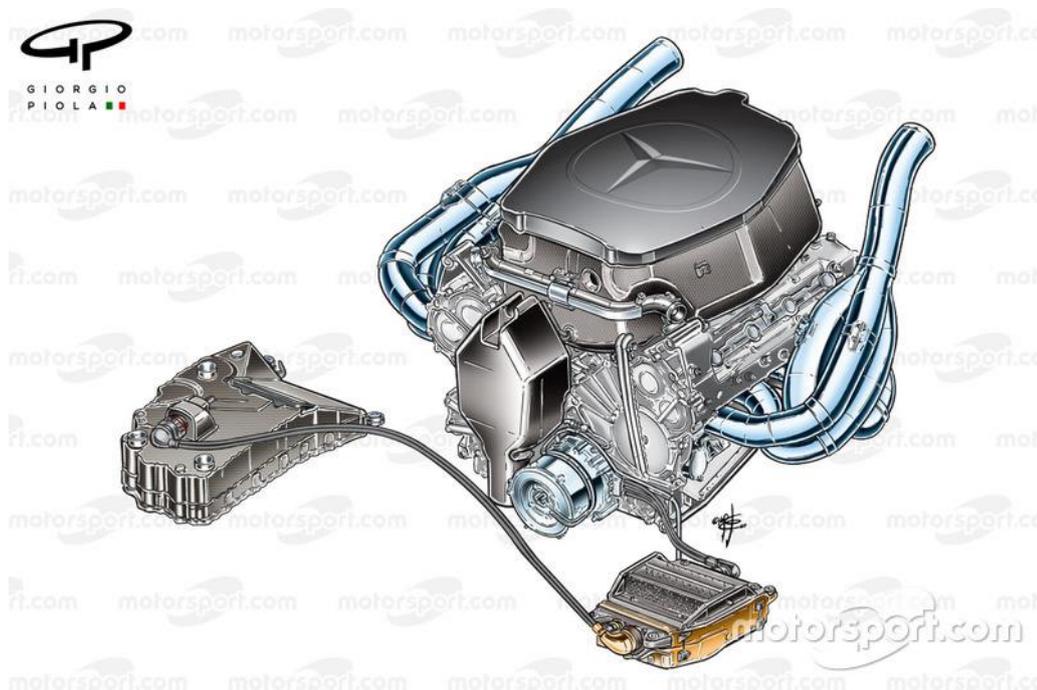
En los vehículos eléctricos e híbridos se incorpora un motor-generator en la transmisión, este componente convierte la energía eléctrica en mecánica cuando esta funcionando como motor, mientras que al dejar de acelerar se convierte en un generador de energía. El funcionamiento del sistema empieza al presionar el pedal de freno, la pastilla y el disco de freno se someten a una fricción consiguiendo que el movimiento vaya disminuyendo progresivamente hasta detenerse completamente (Zhang et al., 2019).

El funcionamiento del freno regenerativo se basa en hacer girar un conjunto de imanes alrededor de un eje de espiras. El campo magnético variable producido por el giro de los imanes induce un campo eléctrico en las espiras del núcleo. En el caso de los vehículos los imanes están situados en conjunto con la rueda, mientras que las espiras del estator se encuentran conectadas a través de un circuito hacia una batería.

Según Bauzá (2018) menciona que, al producirse el campo eléctrico aparece una fuerza mecánica que se opone al giro de los imanes, esto es debido a que al circular corriente por la espira esta produce un tercer campo magnético. Al oponerse los campos magnéticos, estos trataran de equilibrarse y el neumático intentara frenarse.

## 1.8.2 KERS (SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA)

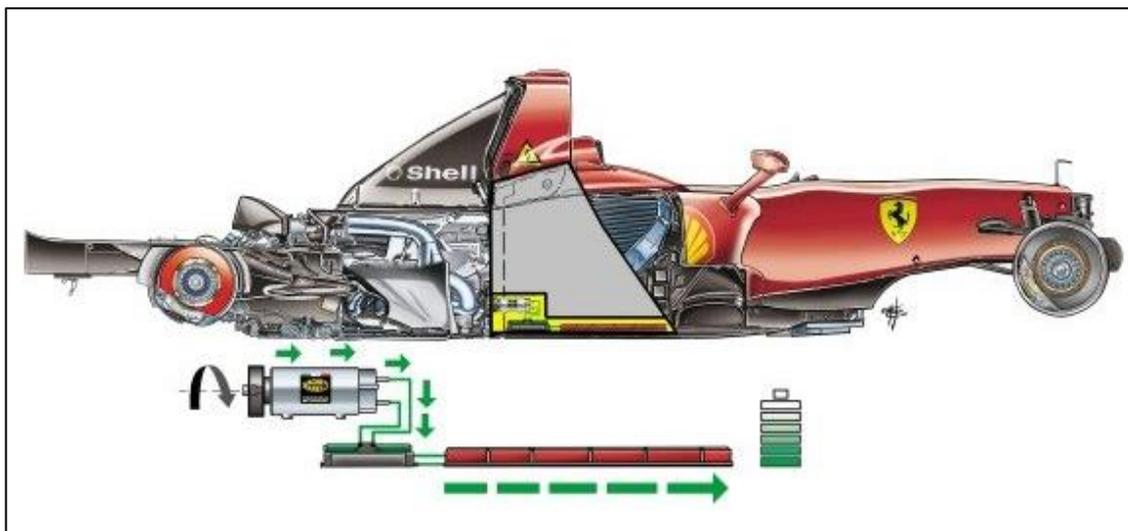
El denominado KERS (Kinetic Energy Recovery System), fue adaptado en el 2009 por parte de la fórmula 1, siendo de esta forma el grupo BMW en introducir este sistema. A partir de ahí surgieron varias adaptaciones en las diferentes marcas de vehículos, de esta manera Ferrari, McLaren-Mercedes y Renault presentaron modelos que incluían el sistema KERS en el Gran Premio de Australia.



**Figura 1.11** McLaren-Mercedes Fórmula 1 (sistema KERS)

([www.motorsportimages.com](http://www.motorsportimages.com))

El principio de funcionamiento que tiene este sistema KERS es similar al freno regenerativo convencional, consiste en la recuperación de energía en forma de calor que se produce en acciones de frenado y la almacena en acumuladores de energía que son las baterías si se trata de un KERS eléctrico o en un volante de inercia si se trata de un KERS mecánico. En el 2009 su uso en la F1 fue notable, la energía almacenada era liberada y transmitida a las ruedas debido a un interruptor que se ubicaba en el volante.



**Figura 1.12** Funcionamiento del KERS en la fórmula 1

([www.motorsportimages.com](http://www.motorsportimages.com))

En la figura 1.12 se observa el aprovechamiento de la energía cinética desde el eje acoplado al motor-generador y el posterior almacenamiento de energía eléctrica en la batería.

El sistema de recuperación de energía cinética se compone de una serie de elementos y conjuntos indispensables para su funcionamiento, estos dispositivos variaran de acuerdo con el tipo de tecnología que se utilice, pudiendo ser KERS mecánico, eléctrico o hidráulico.

## CAPÍTULO II

### 2 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1 MATERIALES

Los materiales que intervienen en el presente trabajo de grado han sido especificados, detallados y seleccionados de acuerdo con las necesidades de funcionamiento, además se han clasificado como se muestra a continuación:

- Kit para bicicleta eléctrica 40V/500W:
  - 1 Motor de cubo sin escobillas de 500W de potencia
  - 1 Controlador electrónico
  - 1 Acelerador de pulgar
  - 1 Batería de litio de 40V/12.5 Ah
  - 2 Palancas de freno electrónicas
  - 1 Pantalla led
  - 1 PAS (sensor de asistencia de pedaleo)
- Módulo de supercondensadores 16V/1.6F

##### 2.1.1 MOTOR DE CUBO SIN ESCOBILLAS 500W

En la figura 2.1 se observa la rueda en conjunto con el motor eléctrico brushless, la estructura de este tipo de motor sin escobillas viene compuesto de un rotor como parte móvil donde se encuentran los imanes permanentes de neodimio y un estator que es la parte fija donde se localiza el bobinado de hilo.

En estos motores la corriente eléctrica va directo al bobinado de la carcasa (estator), por ende, no hace falta tener escobillas ni algún elemento que recolecte como se usa en los motores con escobillas.



**Figura 2.1** Motor de cubo sin escobillas

La corriente produce un campo electromagnético que actúa con el campo magnético generado por los imanes de neodimio del rotor, teniendo la suficiente fuerza para hacer girar al rotor y conjuntamente al eje del motor (Chiriboga & Moyano, 2017). En la tabla 2.1 se presentan las características pertenecientes al motor brushless.

**Tabla 2.1** Características del motor eléctrico

<b>Especificaciones</b>	<b>Características</b>
Voltaje	48 V
Potencia nominal	500 W
RPM	300-500
Par	14-73 Nm
Peso	7.5 kg

**Elaborado por:** Los autores

### **2.1.2 CONTROLADOR ELECTRÓNICO**

En la figura 2.2 se encuentra el controlador electrónico, este es el elemento encargado de gestionar la energía de la batería entregada hacia el interior del motor, es el cerebro que vela

por el correcto funcionamiento de todo el circuito eléctrico. Mediante la gestión de la máxima intensidad que pueda soportar el controlador se limita la potencia real que se envía al motor.



**Figura 2.2** Controlador electrónico

En la tabla 2.2 se plasman las características correspondientes del controlador electrónico de la bicicleta eléctrica.

**Tabla 2.2** Características del controlador electrónico

<b>Especificaciones</b>	<b>Características</b>
Voltaje nominal	DC 36V/ 48V
Corriente nominal	11A
Corriente máxima	22A
Peso	350g

**Elaborado por:** Los autores

### 2.1.3 ACELERADOR DE PULGAR

En la figura 2.3 se observa el acelerador de pulgar, este es el accesorio electrónico que permite el control constante y sensible de la velocidad en una bicicleta eléctrica, pudiendo ser ubicado tanto en el lado derecho como izquierdo del manubrio.



**Figura 2.3** Acelerador de pulgar

### 2.1.4 BATERÍA DE LITIO DE 40V/12.5 Ah

En la figura 2.4 es posible apreciar la batería de litio con su respectivo soporte para su ubicación en la bicicleta, posee un sistema de seguridad antirrobo con un candado evitando el desacoplamiento de la batería.



**Figura 2.4** Batería de litio

Las baterías Li-Ion son aquellas que implican una mejorada tecnología, posee alrededor de 2 o 3 veces mayor vida útil que una batería de plomo. Tienen características novedosas, con un peso más ligero que las de NiMH y las de plomo, además presentan un mantenimiento reducido.

La tabla 2.3 muestra las características correspondientes de la batería de Li-Ion utilizada por el kit Ebike, mostrando las características más importantes.

**Tabla 2.3** Características de la batería de litio

<b>Especificaciones</b>	<b>Características</b>
Voltaje nominal	40V
Capacidad nominal	12.5Ah
Peso	3.6kg
Ciclo de vida	> 800 ciclos
Potencia energética	540Wh
Corriente de carga estándar	2A

**Elaborado por:** Los autores

### **2.1.5 PALANCAS DE FRENO ELECTRÒNICAS**

En la figura 2.5 se aprecian las palancas de freno electrónicas incluidas en el kit de Ebike. Estos dispositivos permiten el corte de alimentación hacia el motor, cuando se aplican los frenos y el acelerador deja de ser operado, trabajan conjuntamente para garantizar la seguridad durante la conducción.



**Figura 2.5** Palancas de freno electrónicas

### 2.1.6 PANTALLA LED

En la figura 2.6 se encuentra la pantalla led incluida en el kit de bicicleta eléctrica. Dispositivo electrónico que permite visualizar el estado de carga de la batería, seleccionar los niveles de velocidad del motor eléctrico, consta de diferentes botones para realizar configuraciones, se encuentra conectado directamente al controlador y muestra la velocidad de circulación.



**Figura 2.6** Pantalla led

### 2.1.7 PAS (SENSOR DE ASISTENCIA DE PEDALEO)

En la figura 2.7 se observa el PAS incluido en el kit Ebike. El sensor de pedaleo o de velocidad está formado por un detector inductivo situado delante de un disco de imanes que gira en conjunto con el eje de los pedales. El paso de los imanes junto al sensor muestra que

los pedales se encuentran girando. Al producirse esta señal se envía la información al controlador del motor para generar el movimiento o detener su funcionamiento.



**Figura 2.7 PAS**

Las características de este sensor se mencionan en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4** Características del PAS

<b>Especificaciones</b>	<b>Características</b>
Material	Acero
Imanes	8
Peso	Aprox. 50 g
Diámetro del disco	Aprox. 65 mm

**Elaborado por:** Los autores

### **2.1.8 MÓDULO DE SUPERCONDENSADORES 16V/1.6F**

En la figura 2.8 se muestran los supercondensadores conectados en serie, los cuales se utilizaron en el trabajo de grado.

Los supercondensadores son dispositivos electroquímicos de elevada capacidad cuyo valor puede llegar a varios miles de Faradios. Gracias a esta característica, en la actualidad los supercondensadores se están utilizando como sistemas de almacenamiento de energía eficientes y de gran fiabilidad (Luengo et al., 2013).



**Figura 2.8** Módulo de supercondensadores

En la tabla 2.5 se encuentran las características más importantes de los módulos de supercondensadores.

**Tabla 2.5** Características del módulo de supercondensadores

<b>Especificaciones</b>	<b>Características</b>
Capacidad nominal	1.6F
Almacenamiento de energía	10.1mWh
Voltaje nominal	16.2V
Resistencia interna (AC)	20mΩ
Corriente continua máxima	10A
Corriente absoluta máxima	10.3A
Corriente de fuga 25°C	23 μA
Ciclo de vida	≥ 500.000
Peso	8.9867 g
Rango de temperatura operación	40 – 65 °C
Rango de temperatura almacenamiento	40 – 70 °C

**Elaborado por:** Los autores

## **2.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

A lo largo de la descripción del presente capítulo se encuentran detallados los procesos ideales que fueron empleados para llevar a cabo la correcta realización del trabajo de grado, la metodología empleada garantiza la validez científica a cada proceso ejecutado, así como el análisis de los resultados obtenidos de las pruebas correspondientes. Logrando cumplir los objetivos planteados al inicio de la investigación.

### **2.2.1 TIPOS DE INVESTIGACIÓN**

Los tipos de investigación de acuerdo con los aspectos más importantes se dividen a continuación:

- Investigación según su objetivo: tecnológica, teórica, científica.
- Investigación según intervención: experimental, observación.
- Investigación según el tiempo: transversal, longitudinal.

El trabajo de grado presente se encuentra comprendido dentro del grupo de investigación tecnológica, debido a que se orienta en la búsqueda de alternativas viables para mejorar una fuente amigable de energía que aporte capacidad durante la ejecución de un trabajo óptimo con relación a la autonomía que presentan las bicicletas eléctricas. De igual manera, otro tipo de investigación empleada es la del tipo experimental, conforme con la idea planteada se elabora un sistema electrónico auxiliar montado juntamente con la batería, ejecutando un funcionamiento en conjunto de los elementos señalados.

Otro tipo de investigación es la bibliográfica, misma que es llevada a cabo durante la ejecución de cada avance, la obtención de la información consta de varios apartados científicos con el sustento adecuado, para realizar cada proceso con los conocimientos apropiados, por lo cual las fuentes utilizadas son: libros, tesis de grado similares, fuentes de internet, artículos científicos, entre otras.

## 2.2.2 MÉTODO

### ➤ Método científico y lógico deductivo

El método científico fue empleado durante el proceso investigativo, ya que gracias a él se puede analizar varios aspectos en relación a la movilidad eléctrica, con lo que se puede discernir y estimar varias alternativas para mejorar la autonomía no solo en las bicicletas eléctricas, sino también en los demás vehículos tanto eléctricos como híbridos, este proceso o método abarca desde la definición, aplicación y la conceptualización hasta poder llegar al cumplimiento de los objetivos y por consiguiente obtener las conclusiones acertadas.

Asimismo, el método lógico deductivo se aprecia dentro de la investigación ya que su aplicación permite que el trabajo de grado realice una conexión de modo híbrida entre un módulo de supercondensadores y la batería de litio que conforma el conjunto o circuito matriz del presente proyecto, desempeñando un trabajo combinado e incrementando las características de la batería mencionada, dichas actividades y su aplicación son llevadas a cabo teniendo presente los conocimientos adecuados de electrónica automotriz adquiridos en el proceso de aprendizaje universitario.

## 2.3 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

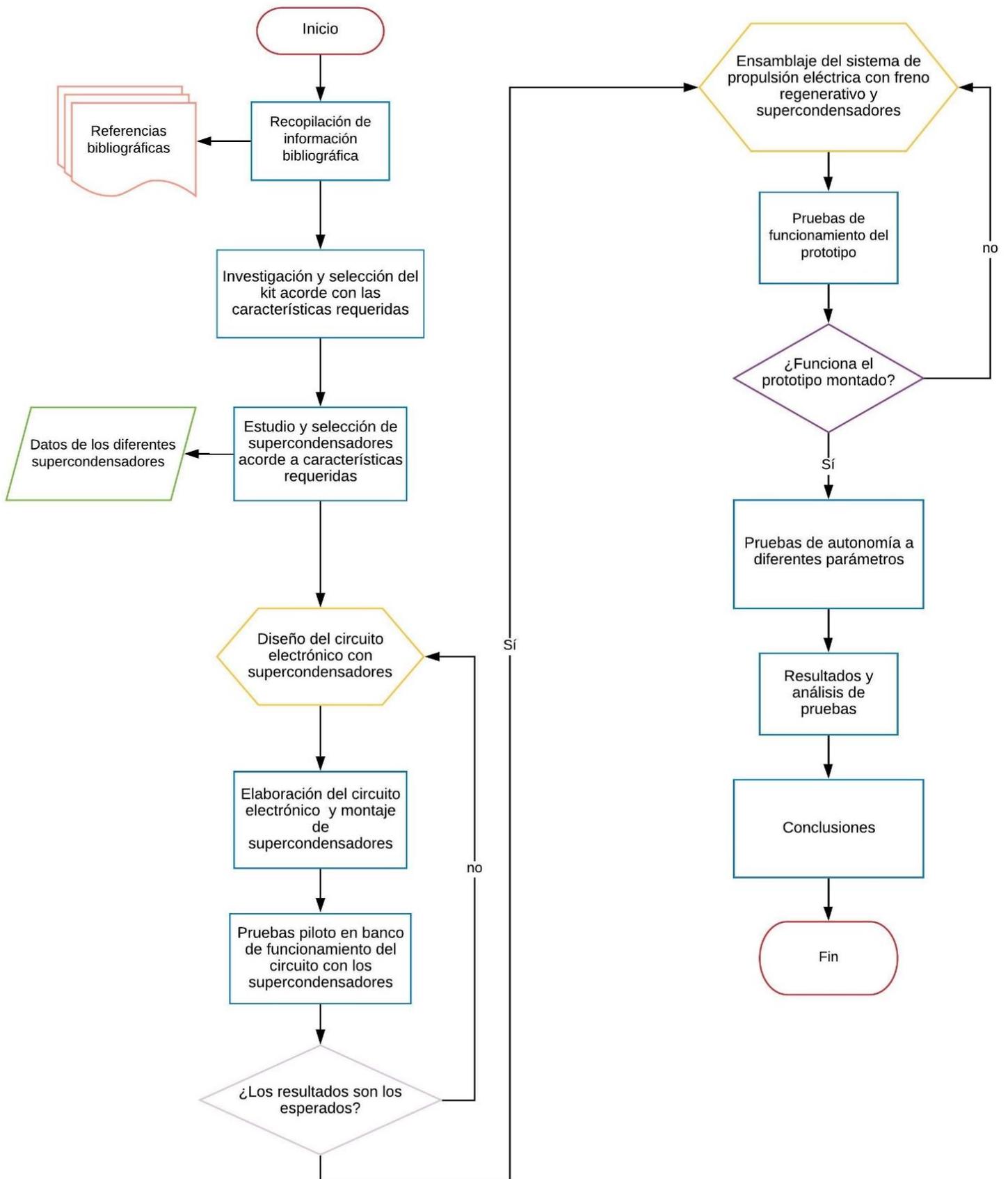
El desarrollo de esta investigación busca mejorar la autonomía de las baterías de litio implementando elementos alternativos para el almacenamiento de energía, en este caso se utilizan supercondensadores. El proyecto inicia con el diseño del sistema en el software denominado “Proteus”.

La investigación planteada se enfoca en diseñar y analizar un circuito que permita el aprovechamiento de la energía producida por un generador CA, así como comprender el comportamiento de un sistema híbrido de almacenamiento de energía eléctrica. Esta es la razón por la cual se adquirió y utilizó un kit para bicicletas eléctricas ya que posee la acción de freno regenerativo y puede ser aprovechada la energía producida durante su funcionamiento.

El resultado del circuito elaborado y el kit de propulsión eléctricas se ensamblan en una bicicleta que sirve como base para analizar el funcionamiento del proyecto. Los datos son evaluados luego de realizar pruebas de desempeño de la autonomía en ruta con la intervención del componente y otra sin su empleo.

Con esta propuesta se aporta al desarrollo de un medio de transporte alternativo y con una propulsión que busca ser amigable con el medio ambiente.

El proceso con el cual se desarrolló la propuesta se muestra en la figura 2.9.



**Figura 2.9** Flujograma de la propuesta

### 2.3.1 INVESTIGACIÓN Y SELECCIÓN DEL KIT ACORDE CON LAS CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS.

Para llevar a cabo la investigación y su posterior selección del kit adecuado para el desarrollo de la propuesta se basó esencialmente en distintos parámetros que son mencionados a continuación:

**Freno regenerativo:** entre los factores más importantes para la elección del kit es la acción de freno regenerativo, de esta manera es posible recuperar cierta cantidad energética que se produce por la acción del frenado y aprovecharla mediante el circuito electrónico auxiliar con los supercondensadores.

**Potencia del motor:** este parámetro se proporciona en la ficha técnica que muestra el fabricante, para la elección correcta es necesario analizar la geografía de la ruta escogida para las pruebas, tomando en cuenta los desniveles existentes en el camino.

**Consumo energético:** estos valores son diferentes de acuerdo con la elección de cada nivel de trabajo que presenta el motor eléctrico.

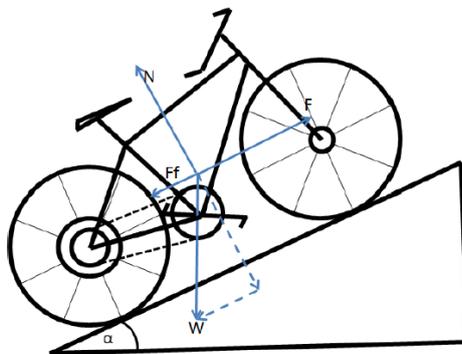
**Autonomía:** este parámetro muestra la distancia máxima que se alcanza con la carga de la batería, característica esencial que sirve de punto de partida para la ejecución del trabajo.

**Precio de adquisición:** se indica el valor de compra unitario del kit de bicicleta eléctrica existente en el país y en el exterior, que cumpla con los parámetros principales y posea un precio asequible.

#### ➤ **Potencia del motor**

La determinación del tren de potencia es un pilar base para realizar la selección del kit necesario, por lo tanto el estudio inicia con el análisis de la potencia requerida para circular con normalidad dentro de los desniveles existentes en la ruta escogida para la ejecución de las pruebas; en el análisis de potencia es necesario desarrollar las fuerzas existentes al

momento de poner en marcha al vehículo eléctrico, estas son: resistencia a la rodadura, resistencia gravitatoria, resistencia aerodinámica y la resistencia por aceleración.



**Figura 2.10** Diagrama de cuerpo libre de bicicleta

(Hoyos et al., 2014, pág. 61)

De acuerdo con la figura 2.10 se pueden identificar las fuerzas existentes que se oponen a la circulación o movimiento, analizando estas fuerzas es posible determinar la potencia requerida del motor eléctrico, de igual manera obtener el valor de autonomía y consumo energético que son necesarias para el dimensionamiento, además el grado de inclinación es sumamente indispensable dentro de los cálculos llevados a cabo.

### ➤ Resistencia a la rodadura

La generación de la resistencia a la rodadura existe cuando 2 cuerpos se encuentran en contacto, en este caso el contacto existente entre el neumático y la calzada, para lo cual es importante investigar acerca de las variaciones que pueden existir al emplear distintos tipos de neumáticos.

Para determinar el valor de la resistencia a la rodadura se emplea la ecuación 2.1 conforme a las especificaciones para distintos vehículos, de esta manera se obtiene la adecuada eficiencia de movilidad empleando los datos más críticos para poder circular por distintas rutas.

$$F_r = m \cdot g \cdot f$$

[Ec. 2.1]

Donde:

$F_r$  = resistencia a la rodadura (N)

$m$  = masa (kg)

$g$  = gravedad ( $\frac{m}{s^2}$ )

$f$  = coeficiente a la rodadura (adimensional)

Para la entrada de datos se considera que masa será la sumatoria total, tanto de la bicicleta y el peso promedio de una persona, datos indispensables para el análisis de la resistencia a la rodadura. El coeficiente de resistencia de rodadura  $f$  expresa los valores utilizados para ruedas con cubiertas neumáticas (Marchese, 2018). Por lo tanto, para el análisis del trabajo propuesto se requiere conocer el valor del coeficiente de rodadura en bicicletas eléctricas, dato específico proporcionado en la tabla 2.6.

**Tabla 2.6** Coeficientes de rodadura para distintos neumáticos

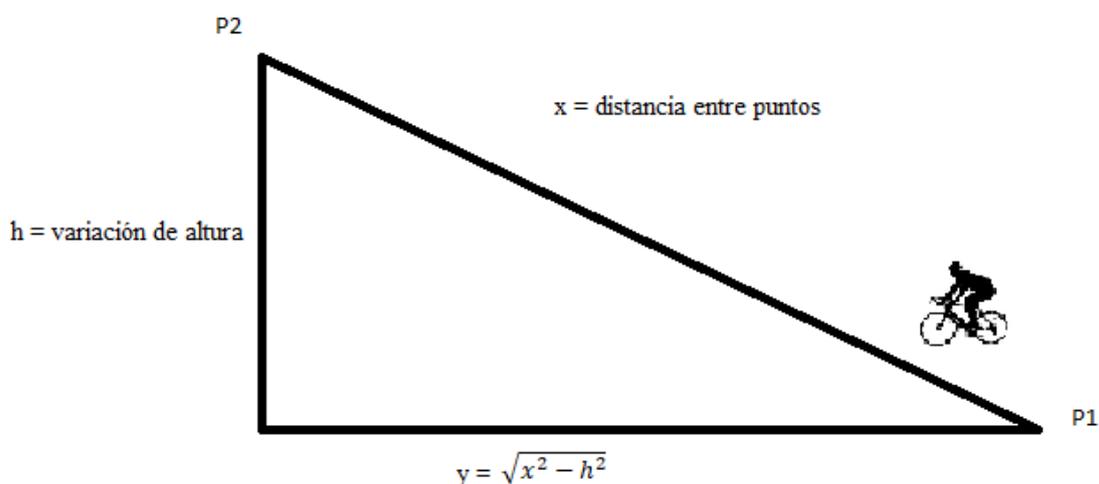
<b>Coeficientes de rodadura en distintos tipos de neumáticos</b>	
<b>Tipo de neumático</b>	<b>Coeficiente de rodadura (<math>f</math>)</b>
Especial de bicicletas	0.0055
Automóviles de baja resistencia	0.006 a 0.010
Camino sobre carretera lisa	0.006 a 0.010
Automóviles en general	0.010 a 0.015

**Elaborado por:** Los autores

**Fuente:** (Rivadeneira, 2021, pág.45)

➤ **Resistencia gravitatoria**

Se puede determinar la variación de altura existente en distintos puntos por medio de la altitud que se alcanza en una determinada distancia de recorrido, con este cambio de altura entre dos sitios, se identifica la pendiente existente en ese tramo de ruta analizado, este factor es indispensable para la selección adecuada del motor.



**Figura 2.11** Parámetros de determinación de la pendiente

La figura 2.11 presenta los parámetros que permiten determinar la variación de altura existente en diferentes tramos de la ruta, por medio de la aplicación móvil “Altímetro” se puede obtener los datos de P1 y P2, la variación de altura se consigue de la diferencia de estos puntos y posteriormente se realiza el cálculo de la pendiente conforme al tramo analizado en la respectiva ruta. Con estos valores se procede a la ecuación 2.2 para obtener el porcentaje de inclinación:

$$\text{Pendiente} = \frac{h}{y} * 100\%$$

[Ec. 2.2]

Normalmente el valor de las pendientes viene dado en porcentajes, por lo tanto, es necesario obtener este valor en grados, para lo cual se emplea la ecuación 2.3 mostrada a continuación:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\theta \%}{100}$$

[Ec. 2.3]

Donde:

$\theta \% =$  ángulo de inclinación (%)

$\theta =$  ángulo de inclinación (°)

Con la obtención de estos valores se procede a realizar el cálculo de la resistencia gravitatoria empleando la ecuación 2.4, donde intervienen los parámetros previamente analizados:

$$F_{gr} = m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta)$$

[Ec. 2.4]

Donde:

$F_{gr} =$  resistencia gravitatoria (N)

$g =$  gravedad ( $\frac{m}{s^2}$ )

$m =$  masa del vehículo (kg)

$\theta =$  ángulo de la pendiente (°)

➤ **Resistencia aerodinámica**

Para la resistencia aerodinámica se realiza un análisis de la corriente de aire que se presenta al momento de ejecutarse las pruebas correspondientes, esta resistencia es directamente proporcional a la velocidad de circulación; es decir, mientras más velocidad se alcance en la ruta, mayor será la resistencia aerodinámica. La ecuación 2.5 indica la manera de obtener el cálculo de la resistencia aerodinámica:

$$F_{ae} = \frac{1}{2} * C_{ae} * A * \rho * v^2$$

[Ec. 2.5]

Donde:

$F_{ae}$  = resistencia aerodinámica (N)

$C_{ae}$  = coeficiente aerodinámico (adimensional)

A = sección transversal ( $m^2$ )

$\rho$  = densidad del aire ( $\frac{kg}{m^3}$ )

v = velocidad ( $\frac{m}{s}$ )

El valor del coeficiente aerodinámico es un valor adimensional y se presenta al instante de empezar el movimiento, cabe recalcar que este valor va aumentando al incrementar la velocidad y por ende presentara una mayor resistencia aerodinámica.

Este valor del coeficiente aerodinámico se obtiene de la tabla 2.7 en donde se encuentran algunos coeficientes de acuerdo con el tipo de vehículo a emplear.

**Tabla 2.7** Coeficiente aerodinámico para distintos vehículos

Tipo de vehículo	Coeficiente aerodinámico ( $C_{ae}$ )
Monopatín	0.90
Péndulo invertido	0.90
Automóviles eléctricos pequeños	0.64

**Elaborado por:** Los autores

**Fuente:** (Marchese & Golato, 2011, pág.3)

En la investigación presentada, la velocidad de circulación no será muy elevada ya que la ruta escogida es una carretera principal, por lo tanto, el factor de seguridad aplicado será el que indicará la velocidad adecuada de circulación.

Para conocer los datos asociados al área transversal de la bicicleta analizada se procedió a determinar el área frontal de la bicicleta y los neumáticos, dichos valores se muestran en la tabla 2.8 ya que son parámetros determinantes para conocer el área total que está en contacto con el aire.

**Tabla 2.8** Área frontal de la bicicleta

Elemento	Ancho (m)	Alto (m)	Área ( $m^2$ )
Neumático delantero	0.05	0.66	0.033
Neumático trasero	0.05	0.66	0.033
Manubrio	0.65	1	0.65
Marco frontal	0.13	0.40	0.052
<b>Área total</b>			<b>0.768</b>

**Elaborado por:** Los autores

La densidad del aire es un parámetro determinante para calcular la resistencia aerodinámica, se considera un punto intermedio en la ruta, siendo esta en Atuntaqui, donde se muestra una elevación promedio de 2400 m.s.n.m. que se encuentran a 75.6 kPa y su temperatura promedio anual es de 17.5°C; por lo tanto, la ecuación 2.6 indica la manera de obtener este valor:

$$\rho = \rho_{\text{aire seco}} * \frac{p}{1\text{atm}} * \frac{Rd}{273.16+T}$$

[Ec. 2.6]

Donde:

$$\rho_{\text{aire seco}} = \text{presión del aire seco} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

1 atm = unidad de presión atmosférica (kPa)

$$Rd = \text{cte del gas de aire seco} \left( \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}^\circ} \right)$$

### ➤ Resistencia por aceleración

A medida que se obtienen distintas velocidades de circulación durante los tramos analizados de la ruta, varía de igual manera la aceleración existente en cada trayecto, con este valor se obtiene la resistencia generada. La ecuación 2.7 pertenece a un movimiento variado en la cual se requiere obtener la aceleración, hay que tener en cuenta que el valor de la velocidad inicial es 0 km/h y que la velocidad máxima es de 20 km/h.

$$vf^2 = vo^2 + 2 * a * d$$

[Ec. 2.7]

Donde:

vf = velocidad final (m/s)

vo = velocidad inicial (m/s)

a = aceleración  $\left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$

d = distancia (m)

Con este valor de aceleración calculado en la anterior ecuación, se procede a realizar el reemplazo correspondiente en la ecuación 2.8, la cual indica el cálculo de la resistencia por aceleración.

$$F_{ac} = m \cdot a$$

[Ec. 2.8]

Donde:

$F_{ac}$  = resistencia por aceleración (N)

$m$  = masa (kg)

$a$  = aceleración ( $\frac{m}{s^2}$ )

### ➤ Resistencia total

Para la obtención del cálculo de la resistencia total o la fuerza de impulsión, es necesario conseguir los valores de las resistencias obtenidos con anterioridad, el resultado de esta resistencia total resulta de la sumatoria de los datos ya mencionados y se indica en la ecuación 2.9 detallada a continuación:

$$F_t = F_r + F_{gr} + F_{ae} + F_{ac}$$

[Ec. 2.9]

Donde:

$F_t$  = resistencia total o fuerza de impulsión (N)

$F_r$  = resistencia a la rodadura (N)

$F_{gr}$  = resistencia gravitatoria (N)

$F_{ae}$  = resistencia aerodinámica (N)

$F_{ac}$  = resistencia por aceleración (N)

➤ **Cálculo potencia requerida del motor**

Para la ejecución del cálculo de la potencia requerida del motor se lo hace tomando en cuenta la pendiente más alta que se obtiene en un tramo específico de la ruta seleccionada, este parámetro es importante debido a que se necesita conocer si el motor es capaz de circular de manera eficiente por dicho tramo, mientras que la velocidad es el factor determinante dentro de este cálculo para conocer la potencia; por lo tanto, la ecuación 2.10 muestra su cálculo:

$$P_m = F_t * V_{\max}$$

[Ec. 2.10]

Donde:

$P_m$  = potencia requerida del motor (W)

$F_t$  = resistencia total (N)

$V_{\max}$  = velocidad máxima (m/s)

➤ **Cálculo potencia requerida para el vehículo eléctrico personal**

Para realizar el cálculo de la potencia requerida para un motor eléctrico se toma en cuenta la eficiencia energética de dicho motor. Para la presente investigación se tomó en cuenta que la eficiencia de motores eléctricos es del 80%, mostrando así la ecuación 2.11.

$$P_{mr} = \frac{P_m}{e}$$

[Ec. 2.11]

Donde:

$P_{mr}$  = potencia del motor (W)

$P_m$  = potencia requerida del motor (W)

$e$  = eficiencia energética (%)

➤ **Cálculo de consumo energético**

Finalizados todos los cálculos correspondientes a la potencia requerida del motor, se deriva la determinación del cálculo del consumo energético por medio de la ecuación 2.12 detalla a continuación:

$$C_{en} = \frac{P_{mr} * t}{d}$$

[Ec. 2.12]

Donde:

$C_{en}$  = consumo energético

$P_{mr}$  = potencia del motor (W)

t = tiempo (s)

d = distancia (m)

➤ **Cálculo de autonomía**

Para llevar a cabo el cálculo de autonomía se analizan varios parámetros como: la tensión del motor en cuestión, la capacidad de la batería que resulta ser la cantidad de carga y considerando un 90% de la capacidad con el propósito de prolongar la vida útil de la batería y el consumo energético obtenido con anterioridad, por lo tanto, el cálculo de autonomía se presenta en la ecuación 2.13.

$$\text{Autonomía} = \frac{V_{motor} * C * 0.90}{C_{en}}$$

[Ec. 2.13]

Donde:

$V_{\text{motor}}$  = voltaje del motor (V)

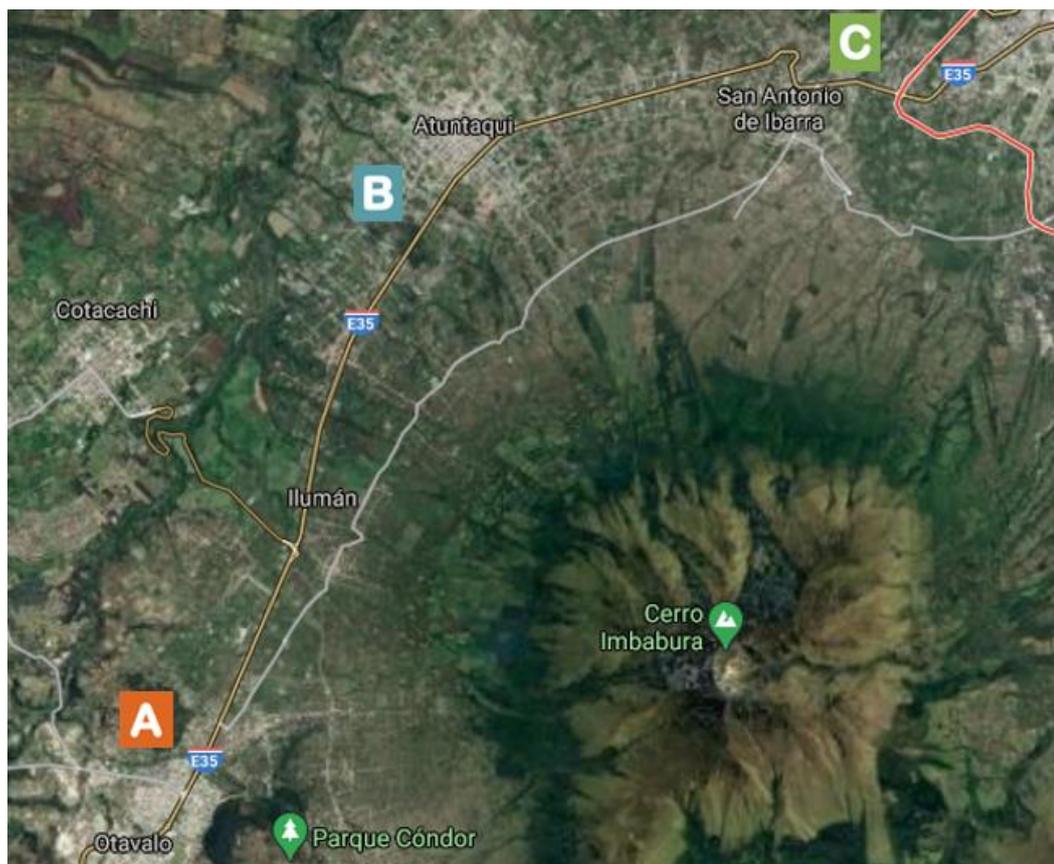
C = capacidad de la batería (Ah)

$C_{\text{en}}$  = consumo energético

### ➤ **Dimensionamiento del tren de potencia**

La bicicleta eléctrica se considera un vehículo de movilidad alternativo, por lo cual se determinó los factores necesarios para el cálculo de potencia y la autonomía que se obtiene de cada prueba ejecutada.

Para la selección adecuada de los componentes del kit, especialmente la potencia del motor, se destinaron 3 distintas pendientes que son los trayectos más críticos, a partir de estos se procede a elegir la potencia requerida del motor para el desarrollo del proyecto. Por tanto, se eligieron los siguientes tramos:



**Figura 2.12** Identificación de tramos en la ruta

En la figura 2.12 se indican los tramos seleccionados en la ruta para obtener el porcentaje de inclinación y proceder a realizar los cálculos correspondientes. El punto A muestra el tramo comprendido entre la Unidad Educativa “Sarance” en Otavalo hasta el semáforo de Peguche, el punto B se señala el tramo comprendido entre la ciudad de Atuntaqui hasta el semáforo ubicado en San Roque, y por último para el tramo C se eligió la pendiente que se encuentra desde el anillo vial hasta el semáforo de Chaltura.

El parámetro destacado a obtener es el porcentaje de inclinación de las pendientes analizadas, de esta forma los valores se indican en la tabla 2.9, obteniendo que la ruta con el mayor porcentaje de inclinación es el tramo del punto B con un 7.13% de inclinación.

**Tabla 2.9** Datos de pendientes en la ruta

Descripción	Tramo		
	Punto A	Punto B	Punto C
Altura máx. (msnm)	2583.5	2578.4	2479.5
Altura mín. (msnm)	2512.2	2510.1	2382.6
h (m)	71.3	68.3	96.9
x (m)	1140	960	1540
y (m)	1137.7	957.5	1536.9
Pendiente (%)	6.27	7.13	6.30
Pendiente (°)	3.58	4.07	3.6

**Elaborado por:** Los autores

Con la obtención de estos datos se procede a realizar el cálculo de cada una de las resistencias previamente descritas para cada tramo de la ruta seleccionada, con estos valores se obtuvo la fuerza de impulsión existente en las 3 pendientes identificadas como las más críticas para la selección de potencia del motor; por tanto, la tabla 2.10 indica dichos valores calculados en cada tramo de la pista.

**Tabla 2.10** Cálculo de fuerza de impulsión en cada punto

Descripción	Tramo		
	Punto A	Punto B	Punto C
Resistencia a la rodadura (N)	7.44	7.44	7.44
Resistencia gravitatoria (N)	36.72	41.73	36.92
Resistencia aerodinámica (N)	9.73	9.73	9.73
Resistencia por aceleración (N)	3.4	4.04	2.52
Fuerza de impulsión (N)	57.29	62.94	56.61

**Elaborado por:** Los autores

La fuerza de impulsión se encuentra registrada en la tabla 2.10 mostrada anteriormente, este valor resulta de la sumatoria de todas las resistencias mencionadas, con este dato se procedió a realizar el cálculo de la potencia del motor, para lo cual se consideró una velocidad de 20 km/h, y una eficiencia energética del 80% citada con antelación. La tabla 2.11 detallada a continuación muestra la potencia requerida del motor, factor elemental en la selección del kit para el desarrollo del proyecto.

**Tabla 2.11** Potencia del motor

Parámetro	Tramo		
	Punto A	Punto B	Punto C
Fuerza de impulsión (N)	57.29	62.94	56.61
Velocidad (m/s)	5.55	5.55	5.55
Potencia requerida del motor (W)	317.96	349.32	314.19
Eficiencia energética (%)	0.8	0.8	0.8
Potencia del motor (W)	397.45	436.65	392.73

**Elaborado por:** Los autores

Una vez obtenida la potencia que se requiere para circular por las pendientes que existen en la ruta seleccionada, se determinó que el kit para bicicletas eléctricas óptimo es el que consta de 1 motor de cubo sin escobillas de 500W de potencia capaz de circular con normalidad y una batería de litio de 40V/12.5 Ah, estos son los elementos más importantes que contiene el kit adquirido.

**Tabla 2.12** Consumo energético

<b>Parámetro</b>	<b>Tramo</b>		
	<b>Punto A</b>	<b>Punto B</b>	<b>Punto C</b>
Potencia del motor (W)	397.45	436.65	392.73
Tiempo a 20 km/h	0.057	0.048	0.077
Distancia (km)	1.14	0.96	1.54
Consumo energético (W/km)	19.87	21.83	19.64

**Elaborado por:** Los autores

La tabla 2.12 muestra los valores de consumo energético obtenidos en cada punto analizado de la ruta, para ello se tomó en cuenta la potencia del motor previamente obtenida, el tiempo que tardó en realizar el recorrido en cada tramo a una velocidad promedio de 20 km/h y la distancia existente en estos trayectos.

Una vez definidos los parámetros de potencia del motor y el consumo energético se proceden a realizar el cálculo de autonomía mostrados en la tabla 2.13 considerando la tensión del motor que se especifica en la tabla 2.1, la capacidad de la batería que de igual forma se obtiene de la tabla 2.3, se consideró un 90% de capacidad de la batería con el propósito de conservar y prolongar su vida útil y, el consumo energético calculado en la tabla anterior.

**Tabla 2.13** Autonomía

<b>Parámetro</b>	<b>Tramo</b>		
	<b>Punto A</b>	<b>Punto B</b>	<b>Punto C</b>
Tensión de motor (V)	48	48	48
Capacidad batería (Ah)	12.5	12.5	12.5
Vida útil (%)	0.9	0.9	0.9
Consumo energético (W/km)	19.87	21.83	19.64
Autonomía (km)	27.18	24.74	27.49

**Elaborado por:** Los autores

### 2.3.2 ESTUDIO Y SELECCIÓN DE SUPERCONDENSADORES ACORDE CON LAS CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS.

La selección de los supercondensadores se llevó a cabo gracias a la información proporcionada por los proveedores, de los cuales se eligieron tres módulos de supercondensadores “Maxwell RoHS de 16V 1.6F, con placa de protección”, ya que entre sus aplicaciones es apropiada para movilidad eléctrica.

Cada módulo de supercondensador puede soportar una diferencia de potencial de 16 V, pero para igualar el voltaje de la batería adquirida en el kit de bicicleta eléctrica previamente seleccionado, es necesario conectar los tres módulos en serie. Para conocer el voltaje que puede soportar el módulo se utiliza la ecuación 2.14:

$$V_t = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

[Ec. 2.14]

Donde:

$V_t$  = voltaje total soportado por el módulo de supercondensadores

$V_n$  = voltaje individual por cada supercondensador

Para conocer la capacidad proporcionada por los supercondensadores conectados en serie se aplica la ecuación 2.15:

$$\frac{1}{C_{\text{Total}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

[Ec. 2.15]

Donde

$C_{\text{Total}}$  = Capacidad total alcanzada por los supercondensadores conectados en serie

$C_1, C_2, C_n$  = capacidad individual de un supercondensador

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 2.14 se determina que el voltaje y la capacidad proporcionada por el módulo de supercondensadores son características adecuadas para ser aplicadas en el prototipo.

**Tabla 2.14** Características módulo de supercondensadores

<b>Características</b>	<b>Datos</b>
Voltaje nominal (V)	48.6
Resistencia interna (mΩ)	540
Capacidad nominal (F)	0.56
Corriente máxima (A)	10

**Elaborado por:** Los autores

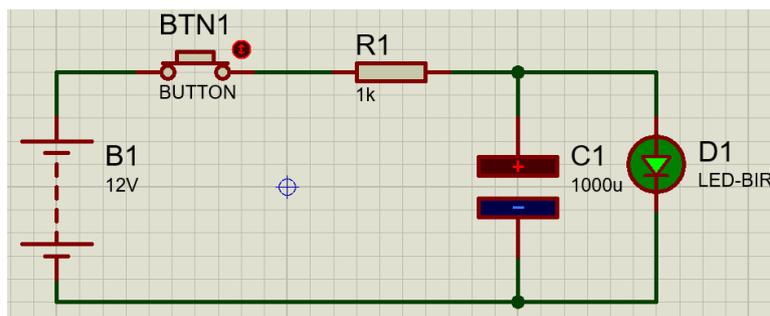
El voltaje nominal alcanzado con esta configuración es la apropiada para ser utilizado durante la acción de freno regenerativo, de la misma manera la capacidad es la adecuada para mantener un margen de seguridad en el circuito.

### **2.3.3 DISEÑO DE CIRCUITO ELECTRÓNICO CON SUPERCONDENSADORES.**

Para el diseño del circuito electrónico se utilizó el programa Proteus ya que este permite simular el funcionamiento del prototipo y realizar mediciones teóricas, obtener los resultados de forma gráfica y numérica mediante el uso de voltímetros, amperímetros y osciloscopio.

Para comprender como actúa un condensador dentro de un circuito eléctrico se realizó un modelo básico utilizando una batería, un condensador, un interruptor y un consumidor (LED) conectados en paralelo, con el fin de entender cómo se realiza la carga y descarga de un condensador. A partir de este funcionamiento se basa la configuración del diseño del proyecto.

En la figura 2.13 se observa el circuito básico aplicado para el funcionamiento de un condensador.



**Figura 2.13** Circuito de carga y descarga de un condensador

El sistema de freno regenerativo se simula mediante un generador trifásico del cual se aprovecha la corriente alterna (CA) generada en cada fase, para realizar la carga de los supercondensadores es necesario rectificar la CA obtenida, por lo que se elaboró un puente de diodos rectificadores de los cuales es posible analizar las gráficas senoidales de cada fase y la gráfica de la corriente rectificada.

#### ➤ Cálculos para el diseño del circuito

Lo más importante para iniciar con el diseño es conocer los parámetros de voltaje promedio generado por el freno regenerativo, de esta manera se obtendrá el voltaje resultante después de la rectificación de la corriente alterna. Otro parámetro importante es conocer la capacidad total que se consigue con los supercondensadores conectados en serie, así como el voltaje máximo que pueden soportar.

- **Proceso para el diseño del puente rectificador**

En la tabla 2.15 se muestran los valores necesarios para obtener los resultados de la corriente rectificada luego de pasar por el puente de diodos.

**Tabla 2.15** Parámetros puente rectificador

Parámetros	Datos
C.A promedio del generador (V)	30
Caída de tensión en los diodos (V)	0,7

**Elaborado por:** Los autores

El cálculo inicia con la búsqueda del voltaje máximo obtenido de C.D mediante la ecuación 2.16:

$$V_{\text{máx}} = \sqrt{2} * VCA$$

[Ec. 2.16]

Donde:

$V_{\text{máx}}$  = Voltaje de CD máxima después de la rectificación

VCA = Voltaje de corriente alterna generada por el freno regenerativo

Para el cálculo del voltaje de rizado después de la rectificación se utilizó la ecuación 2.17:

$$V_{\text{riz}} = V_{\text{máx}} * \frac{10}{100}$$

[Ec. 2.17]

Donde:

$V_{\text{riz}}$  = Voltaje pulsante de CD después de la rectificación

Mediante la ecuación 2.18 se calcula el voltaje promedio de CD rectificadas, se consideró una constante de caída de tensión de 1.4V existente en los diodos conectados en serie.

$$V_{CD} = V_{\text{máx}} - \frac{V_{\text{riz}}}{2} - 1.4$$

[Ec. 2.18]

Donde:

VCD = Voltaje de corriente directa promedio

- **Cálculos del puente rectificador**

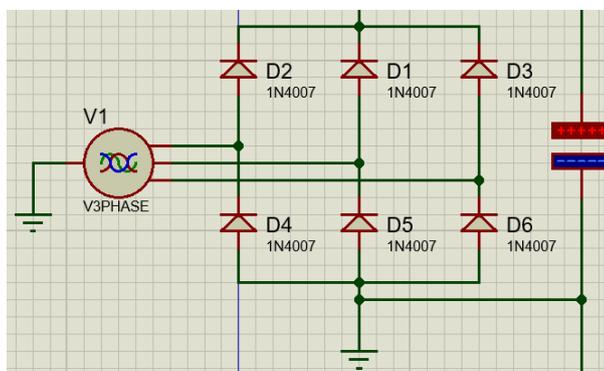
Los cálculos se realizaron mediante la utilización de las fórmulas señaladas anteriormente y se consiguieron los siguientes resultados indicados en la tabla 2.16:

**Tabla 2.16** Cálculos del puente rectificador de diodos

Parámetros	Valor
Voltaje C.C máximo (V)	42.43
Voltaje de rizado (V)	4.24
Voltaje de C.C promedio (V)	38.91

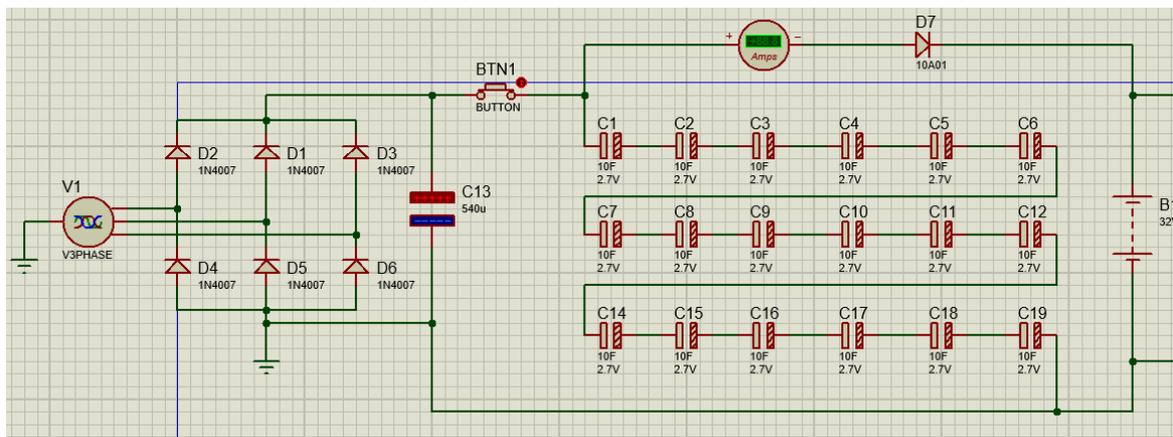
**Elaborado por:** Los autores

En la figura 2.14 se puede apreciar el diseño del puente rectificador y las tres conexiones de fase obtenidas del generador.



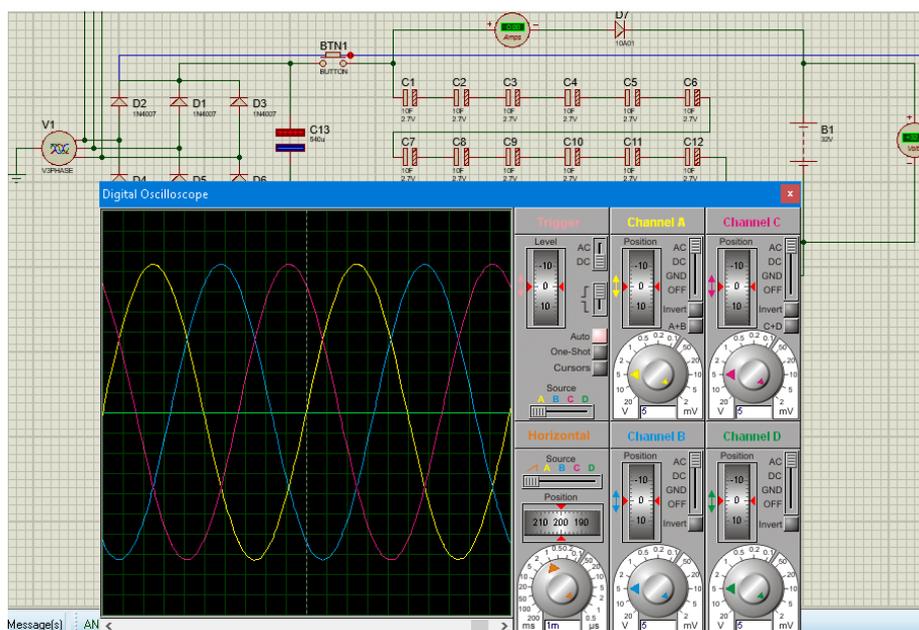
**Figura 2.14** Generador y puente rectificador

En la figura 2.15 se observa el diseño del circuito y elementos complementarios encargados de cumplir una función específica dentro del circuito, todos estos elementos se encuentran plasmados en el modelo planteado.



**Figura 2.15** Diseño de circuito electrónico

Para comprobar que el circuito diseñado cumple con la funcionalidad requerida se procede a la correspondiente simulación digital de elementos de medición dentro del programa Proteus. De esta manera, en la figura 2.16 se muestra de forma gráfica las ondas senoidales de cada fase obtenidas mediante el programa de simulación.



**Figura 2.16** Gráficas obtenidas en el programa

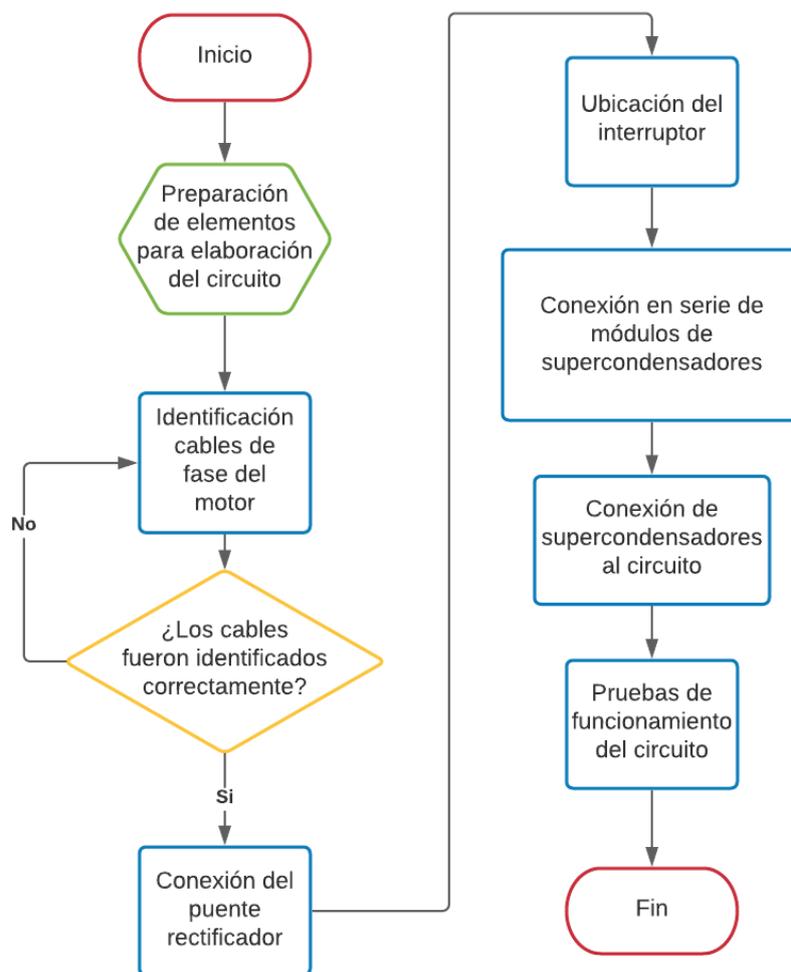
El diseño final del circuito se consiguió utilizando la configuración de funcionamiento del condensador común remplazándolo por los 18 supercondensadores conectados en serie y combinándolo con el generador y el puente de diodos rectificadores, para controlar la carga y descarga del sistema se coloca un interruptor después del puente de diodos. Para simular el consumo de energía durante la carga de la batería de litio se colocó un acumulador, el cual funciona al descargarse los supercondensadores.

Para conocer el consumo de corriente en el circuito y el voltaje que circula por los supercondensadores se realiza la simulación mediante la aplicación de un voltímetro y amperímetro, de esta manera se puede conocer si el circuito presenta algún inconveniente o si todo está funcionando correctamente.

El acumulador que simula la batería de litio se encuentra programado con un voltaje de 32V, permitiendo que el sistema realice el trabajo de recarga, así también es importante programar la resistencia interna de la batería de  $0.284\Omega$  proporcionada por el fabricante.

#### **2.3.4 ELABORACIÓN DE CIRCUITO ELECTRÓNICO Y MONTAJE DE SUPERCONDENSADORES.**

Para llevar a cabo la elaboración del circuito electrónico diseñado con anterioridad en el software Proteus y el montaje de supercondensadores, se realizó conforme a una serie de actividades jerárquicas; por lo tanto, la figura 2.17 muestra dichas actividades.



**Figura 2.17** Flujograma elaboración del circuito electrónico

En base al diseño obtenido se procedió a su elaboración, se utilizó cables de 0,812 mm de diámetro (20 AWG), un interruptor para abrir y cerrar el circuito, diodos rectificadores de 6A; todo esto unido al kit de la bicicleta eléctrica y a los tres módulos de supercondensadores conectados en serie.

En la figura 2.18 se observa la identificación y derivación de los tres cables de fase que se conectan al puente de diodos rectificadores.



**Figura 2.18** Conexiones de cables de fase

La elaboración del circuito inicio con la identificación de los 3 cables de fase (verde, amarillo, azul) en el motor brushless, a partir de estos se realizó la conexión de cables a cada fase los cuales se conectaron al puente de diodos rectificador tipo estrella del que se obtienen alrededor de 36V DC. Para mejorar el rizado de la corriente rectificada se utiliza un condensador de 200V-470  $\mu$ F conectados en paralelo al puente rectificador. En la figura 2.19 se muestra la elaboración del puente de diodos rectificadores.

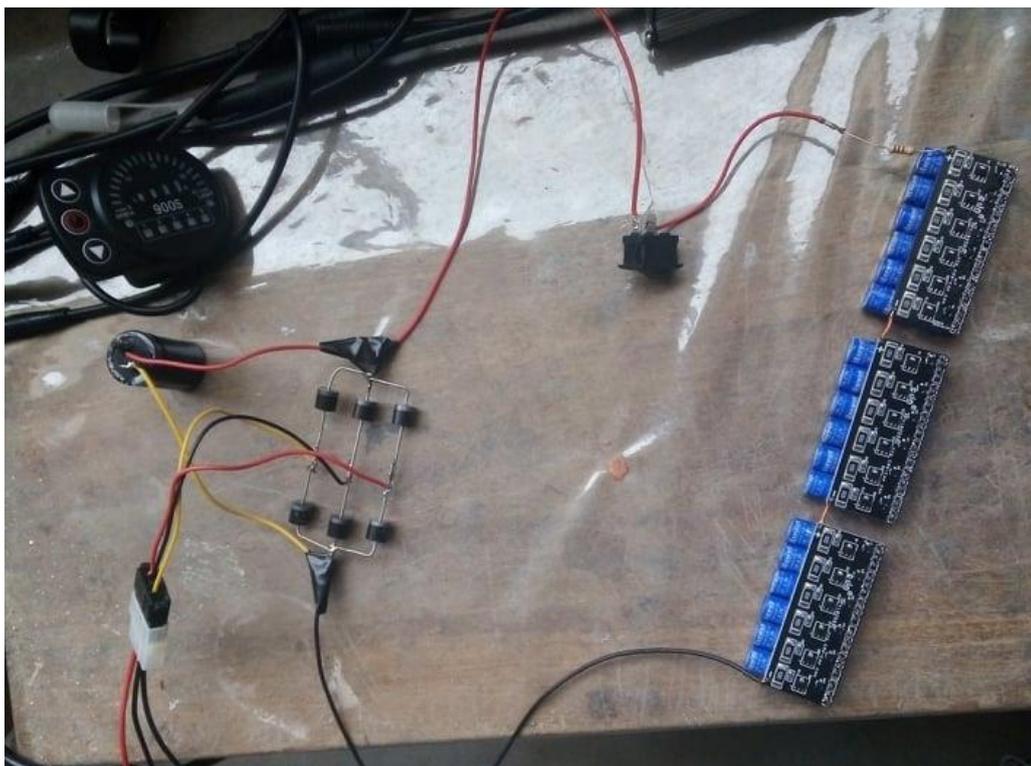


**Figura 2.19** Puente rectificador

Del puente rectificador se obtienen el polo positivo y negativo a los cuales se conectan en paralelo los tres módulos de supercondensadores respetando su polaridad. Para alcanzar la capacidad de 48V los supercondensadores se conectan en serie. Es necesario colocar un interruptor antes del polo positivo de los supercondensadores para controlar su carga y

descarga. En paralelo a los supercondensadores se derivan los cables del positivo y negativo hacia un conector macho similar al cable cargador utilizado para la batería de litio.

La figura 2.20 muestra el proceso de elaboración del circuito, iniciando con el puente rectificador y las conexiones hacia el módulo de supercondensadores.



**Figura 2.20** Elaboración del circuito electrónico

### 2.3.5 PRUEBAS PILOTO EN BANCO DE FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO CON LOS SUPERCONDENSADORES

Las pruebas del circuito elaborado se realizan en un banco que contiene un multímetro, un amperímetro y un osciloscopio los cuales permitieron apreciar el consumo de corriente y la caída de potencial tanto en forma gráfica como numérica.

Con todos los componentes ensamblados de acuerdo con el diagrama diseñado se ha puesto en funcionamiento todo el sistema y de esta forma se ha constatado el correcto trabajo de cada componente.

Se realizaron mediciones del estado de carga de la batería de litio, de esta forma se puede verificar que el sistema cumple su trabajo de carga mediante el freno regenerativo. Con el multímetro también se ejecutó la medición de voltaje en los supercondensadores cargados.



**Figura 2.21** Prueba con multímetro

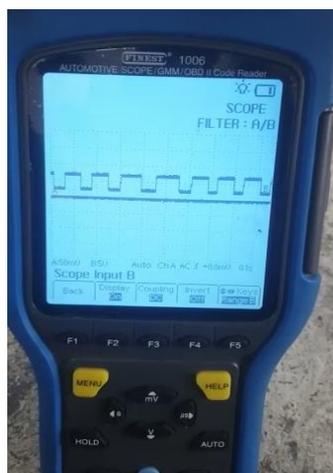
En la figura 2.21 se observa el proceso de comprobación de carga y descarga de los supercondensadores hacia una batería de 12V.

Con el osciloscopio se obtuvieron las gráficas de la corriente alterna producida por las tres fases del generador y la gráfica de la corriente directa rectificada. Además, se ha conseguido la gráfica de la señal producida por el sensor de asistencia de pedaleo. En la figura 2.22 se observa la señal de una fase del generador al aplicar el freno regenerativo, alcanzando una amplitud de 33 V y su frecuencia de 100 Hz.



**Figura 2.22** Señal de fase producida por el generador

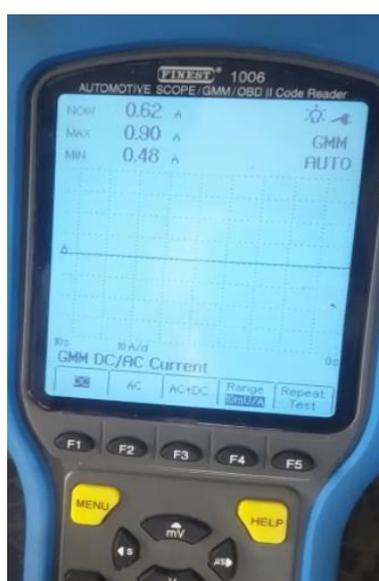
En la figura 2.23 se muestra la señal obtenida del sensor PAS durante el giro de los pedales de la bicicleta. La activación de este sensor y la generación de su señal ocurre en el momento que el detector inductivo empieza a ser afectado por el giro del disco de imanes, mediante esta señal producida se envía la información adecuada al controlador para generar movimiento o detener el funcionamiento del motor eléctrico, esta señal tiene una amplitud de 5V y 5Hz de frecuencia.



**Figura 2.23** Señal del sensor PAS

Mediante el amperímetro se obtuvo el consumo de corriente promedio de 0.62A durante la carga de los supercondensadores y durante su descarga (carga de la batería de litio), además los valores recolectados de consumo de corriente máxima y mínima fueron registrados en 0.90A y 0.48A respectivamente.

En la figura 2.24 se observan los valores de corriente máximos y mínimos obtenidos al cargar y descargar los supercondensadores.



**Figura 2.24** Corriente máxima y mínima de carga

### 2.3.6 ENSAMBLAJE DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA CON FRENO REGENERATIVO Y SUPERCONDENSADORES

El prototipo de la bicicleta con propulsión eléctrica, freno regenerativo y supercondensadores se ensambló luego de realizar las pruebas en banco, la batería se colocó en el tubo inferior del marco, el módulo de supercondensadores se ubicó en el tubo superior del marco, para lo cual fue necesario realizar una placa metálica de soporte, el controlador del sistema de propulsión está ubicado en el tubo posterior del marco, los cables de conexión fueron protegidos con cinta aislante.



**Figura 2.25** Ensamblaje de los componentes

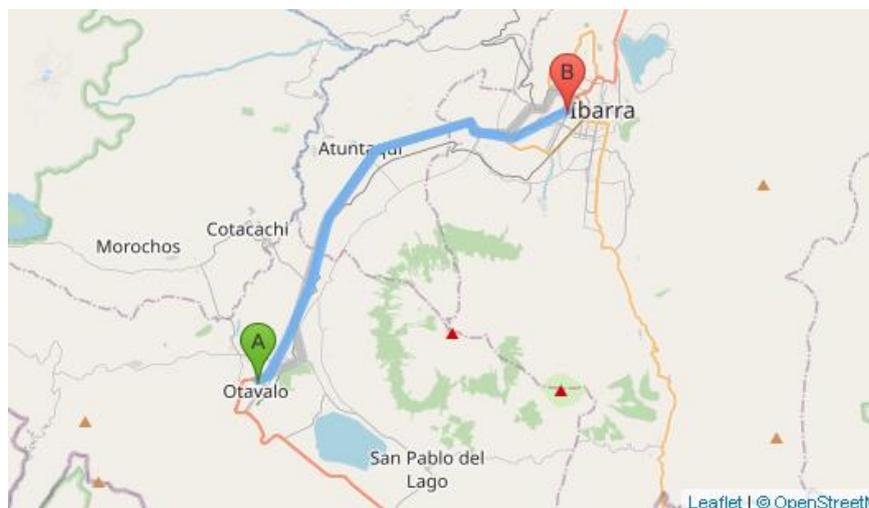
En la figura 2.25 se muestra el proceso de ensamblaje de los componentes del kit de bicicleta eléctrica en conjunto con el circuito diseñado.

### 2.3.7 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.

Luego de montar todo el sistema se realizaron previamente 6 pruebas de manejo en las cuales se comprobó el correcto funcionamiento del prototipo y se efectuaron las mediciones de carga de la batería, de esta forma se garantizó que todas las conexiones se encuentran de forma correcta.

### 2.3.8 PRUEBAS DE AUTONOMÍA A DIFERENTES PARÁMETROS.

Finalmente, con todos los sistemas funcionando de forma adecuada se realizaron las pruebas de autonomía, para lo cual se seleccionó la ruta Otavalo-Ibarra, esta cuenta con 22.5 km de recorrido en los cuales encontramos pendientes y carretera plana.



**Figura 2.26** Ruta de pruebas

En la figura 2.26 se observa la ruta escogida para realizar las pruebas de funcionamiento del prototipo ensamblado.

El sistema de propulsión eléctrica para la bicicleta permite seleccionar 5 niveles de velocidad, al aplicar cada uno de estos es notable la diferencia en el consumo de energía para

cada nivel, su velocidad de circulación en ruta también es distinta, conforme al nivel seleccionado se tendrá distintas distancias de autonomía por parte de la batería.

En la tabla 2.17 se mencionan los valores de amperaje y velocidad promedio que se alcanza en cada nivel de velocidad que se puede seleccionar en el sistema de propulsión.

**Tabla 2.17** Niveles de prestaciones del sistema de propulsión

<b>Nivel</b>	<b>Amperaje (A)</b>	<b>Velocidad promedio (km/h)</b>
<b>1</b>	0.65	19.6
<b>2</b>	0.67	21
<b>3</b>	0.70	27
<b>4</b>	0.84	29.1
<b>5</b>	0.90	31.3

**Elaborado por:** Los autores

Como se puede apreciar en los niveles 1 y 2 que se muestran en la tabla 2.17, el parámetro de velocidad promedio no es apropiado para circular a distancias grandes, ya que, el tiempo de recorrido sería muy extenso, por lo tanto, se seleccionan los niveles de velocidad 3, 4 y 5 para realizar las pruebas del prototipo en el recorrido designado. Es importante mencionar que, el peso del conductor es de 78 kg y su talla de 1.78 m. De la misma manera el peso del prototipo es de 30 kg.



**Figura 2.27** Pruebas de funcionamiento

En la figura 2.27 se muestra el prototipo en funcionamiento y ejecutando el recorrido de pruebas. Se realizaron dos tipos de pruebas, la primera se ejecutó con el sistema de supercondensadores desconectado y la segunda con el sistema conectado.

Al inicio de las pruebas se tomó la medida de voltaje de la batería siendo de 40V, y de la misma manera se realizó la medición de voltaje de 32V al final de cada prueba.

## **CAPÍTULO III**

### **3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

A continuación, en el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos después de realizar las pruebas de autonomía y carga del conjunto híbrido batería- supercondensadores utilizados en la bicicleta eléctrica, con los datos conseguidos se pueden analizar las características que presenta el sistema auxiliar de carga desarrollado y de esta forma determinar las ventajas que ofrece esta tecnología.

Por tanto, se muestran los resultados de forma ordenada en las distintas tablas según los valores de cada parámetro obtenidos en las pruebas, a partir de esto es posible establecer las características existentes entre los dos sistemas analizados, cabe mencionar que las pruebas se realizaron bajo diferentes niveles de velocidad aplicados en una ruta.

Mediante los valores obtenidos y ordenados adecuadamente se realiza el análisis del estado de funcionamiento y desempeño de la bicicleta eléctrica con almacenamiento híbrido, comprobando de esta manera que el sistema auxiliar desarrollado cumple con la funcionalidad y desempeño esperados.

#### **3.2 PRUEBAS EN AUTOPISTA OTAVALO-IBARRA CON PROPULSIÓN ELÉCTRICA SIN SUPERCONDENSADORES**

La prueba de recorrido a través de la autopista Otavalo-Ibarra se inició en el redondel de la Unidad Educativa Otavalo hasta el parque ciudad blanca de Ibarra. Al llegar a la ciudad de Ibarra se midió el voltaje disponible de la batería que fue de 36 Voltios hasta ese momento, luego se realizaron 2 vueltas alrededor del parque y se procedió a retornar hacia la ciudad de

Otavaló por la misma ruta, hasta que se termine toda la energía disponible en la batería, al finalizar el recorrido se tomó el voltaje existente en ese momento de 32 Voltios.

Los datos obtenidos al finalizar cada una de las pruebas se aprecian en las siguientes tablas, estas contienen distintos parámetros, conforme al análisis de cada uno de los datos es posible determinar el comportamiento del sistema.

En la tabla 3.1 se incluyen los valores de diferentes parámetros obtenidos durante las pruebas realizadas sin la aplicación de los supercondensadores.

**Tabla 3.1** Obtención de datos con propulsión eléctrica sin supercondensadores

<b>Parámetros</b>	<b>Prueba 1 (Nivel 3)</b>	<b>Prueba 2 (Nivel 4)</b>	<b>Prueba 3 (Nivel 5)</b>
<b>Distancia (km)</b>	59.72	48.16	47.23
<b>Tiempo</b>	2h 14m 18s	1h 41m 24s	1h 37m 16s
<b>Velocidad promedio (km/h)</b>	27	29.1	29.1
<b>Velocidad máxima (km/h)</b>	60	53.3	60.5
<b>Voltaje inicio de prueba (V)</b>	40	40	40
<b>Voltaje final de prueba (V)</b>	32	32	32
<b>Amperaje (A)</b>	0.70	0.84	0.90

**Elaborado por:** Los autores

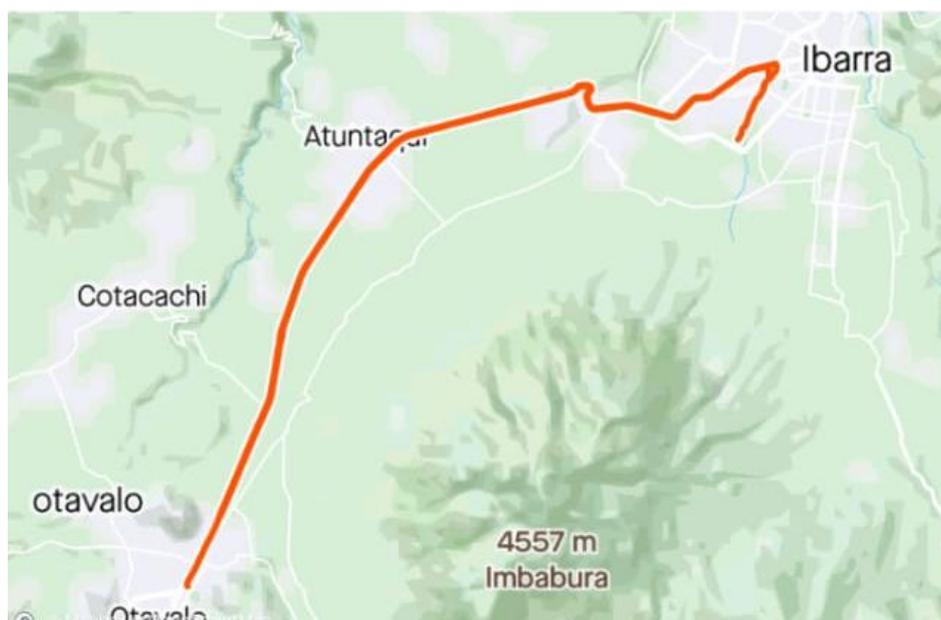
Para el desarrollo de la prueba número 1 se selecciona el nivel 3 indicado en la pantalla del sistema, de esta manera se consiguió alcanzar una velocidad promedio de 27 km/h con una distancia de recorrido de 59.72 km en un tiempo de 2h 14m 18s, la velocidad máxima alcanzada durante la prueba fue de 60 km/h.

La prueba de autonomía número 2 se realizó aplicando el nivel 4 de velocidad que proporciona el sistema de control del motor eléctrico, obteniendo así un tiempo de recorrido de 1h 41m 24s, con una autonomía de la batería de 48.16 km y alcanzando una velocidad

promedio de 29.1 km/h, cabe recalcar que la velocidad máxima que se alcanzó durante este recorrido fue de 53.3 km/h.

Para la prueba número 3 se empleó el nivel de velocidad 5 que proporciona el sistema, se obtuvo un tiempo de recorrido de 1h 37m 16s, la distancia recorrida fue de 47.23 km y una velocidad promedio de 29.1 km/h, la velocidad máxima alcanzada durante esta prueba fue de 60.5 km/h.

Un aspecto importante por mencionar es que la velocidad máxima que se puede alcanzar durante cada prueba depende del tráfico existente en la ruta establecida y las paradas efectuadas por los semáforos en rojo.



**Figura 3.1** Ruta sin supercondensadores

En la figura 3.1 se muestra el recorrido realizado durante estas pruebas sin la aplicación de supercondensadores.

### **3.3 PRUEBAS EN AUTOPISTA OTAVALO-IBARRA CON PROPULSIÓN ELÉCTRICA Y SUPERCONDENSADORES**

Las pruebas desarrolladas a continuación se llevaron a cabo en la ruta Otavalo-Ibarra, de manera similar se transitó de ida y vuelta debido a su distancia, la ejecución de estas pruebas se realizó empleando el sistema de propulsión eléctrica en conjunto con el sistema diseñado de supercondensadores.

La prueba de recorrido a través de la autopista Otavalo-Ibarra se inició igualmente en el redondel de la Unidad Educativa Otavalo hasta el parque ciudad blanca de Ibarra. Al llegar a la ciudad de Ibarra se midió el voltaje disponible de la batería 37.9 Voltios y los supercondensadores 36.9 Voltios hasta ese momento, luego se realizaron 2 vueltas alrededor del parque y se procedió a retornar hacia la ciudad de Otavalo por la misma ruta, hasta que se acabe toda la energía disponible en la batería y los supercondensadores, al finalizar el recorrido se tomó el voltaje existente en ese momento en la batería 32 Voltios y en estas pruebas se midió el nivel de voltaje en los supercondensadores de 31 Voltios.

Los datos recolectados después de cada prueba se mencionan en la siguiente tabla la cual registra distintos parámetros obtenidos durante el funcionamiento, de acuerdo con el análisis de los datos se procede a determinar el comportamiento del sistema de carga híbrido desarrollado.

En la tabla 3.2 se muestran los valores de los diferentes parámetros analizados durante cada prueba aplicando los supercondensadores.

**Tabla 3.2** Obtención de datos con propulsión eléctrica con supercondensadores

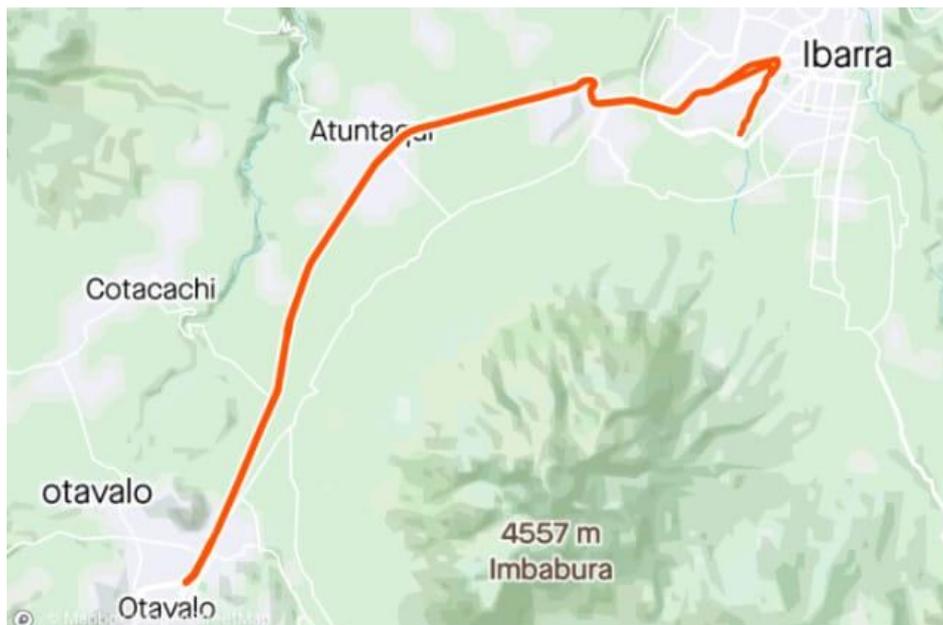
<b>Parámetros</b>	<b>Prueba 1 (Nivel 3)</b>	<b>Prueba 2 (Nivel 4)</b>	<b>Prueba 3 (Nivel 5)</b>
<b>Distancia (km)</b>	64.12	53.51	51.22
<b>Tiempo</b>	2h 20m 53s	1h 51m 38s	1h 38m 18s
<b>Velocidad promedio (km/h)</b>	27.3	28.8	31.3
<b>Velocidad máxima (km/h)</b>	56.2	70.6	62.3
<b>Voltaje inicio de prueba (V)</b>	40	40	40
<b>Voltaje final de prueba (V)</b>	32	32	32
<b>Amperaje (A)</b>	0.70	0.84	0.90

**Elaborado por:** Los autores

La prueba número 1 se realizó aplicando el nivel 3 de velocidad proporcionado por el sistema de propulsión, logrando así una distancia de recorrido de 64.12 km en un tiempo de 2h 20m 53s, la velocidad promedio de circulación fue de 27.3 km/h y alcanzando una velocidad máxima de 56.2 km/h.

La prueba número 2 se llevó a cabo empleando el nivel de velocidad 4 disponible en el sistema del motor eléctrico, en este caso se aplicó el sistema diseñado en conjunto con los supercondensadores, registrando así un tiempo de recorrido de 1h 51m 38s, con una autonomía de 53.51 km y logrando una velocidad promedio de 28.8 km/h, alcanzando una velocidad máxima de 70.6 km/h.

Para la ejecución de la prueba número 3 se empleó el nivel de velocidad 5 establecido por el sistema del motor eléctrico, igualmente se aplicó el sistema auxiliar con supercondensadores, se registró un tiempo de recorrido de 1h 38m 18s, recorriendo una distancia de 51.22 km y una velocidad promedio de 31.3 km/h, la velocidad máxima alcanzada en esta prueba fue de 62.3 km/h.



**Figura 3.2** Ruta con supercondensadores

En la figura 3.2 se observa el recorrido realizado con la aplicación de los supercondensadores.

### **3.4 ANÁLISIS DE AUTONOMÍA DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN ELÉCTRICO SIN SUPERCONDENSADORES Y CON SU APLICACIÓN**

Luego de realizar las pruebas de autonomía en la ruta seleccionada, se proceden a señalar los valores alcanzados con el sistema de propulsión sin supercondensadores y con su aplicación.

En la tabla 3.3 se plasman los resultados obtenidos después de realizar cada prueba sin el uso de supercondensadores y con su aplicación.

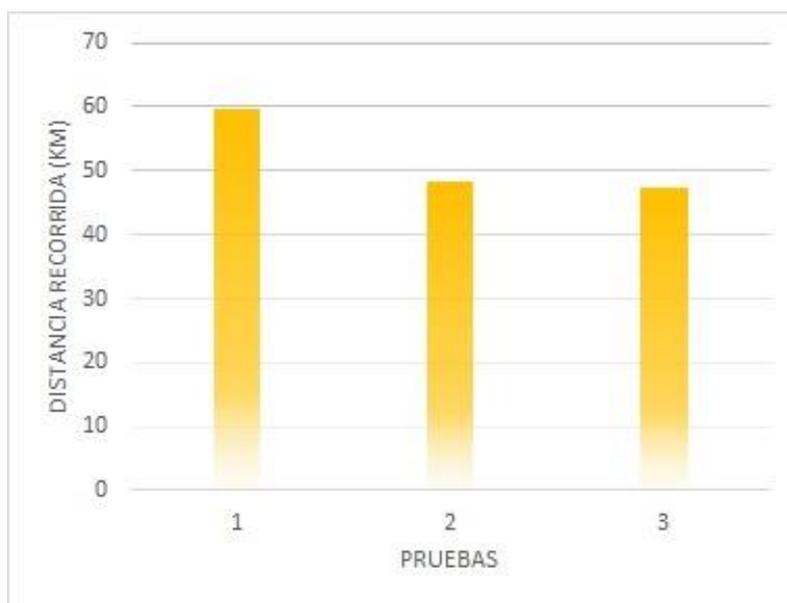
**Tabla 3.3** Resultados de autonomía

<b>Pruebas en autopista Otavalo-Ibarra</b>		
<b>Pruebas</b>	<b>Autonomía con batería de litio</b>	<b>Autonomía con batería de litio y supercondensadores</b>
<b>1</b>	59.72 km	64.12 km
<b>2</b>	48.16 km	53.51 km
<b>3</b>	47.23 km	51.22 km

**Elaborado por:** Los autores

### 3.4.1 AUTONOMÍA CON BATERÍA DE LITIO SIN SUPERCONDENSADORES

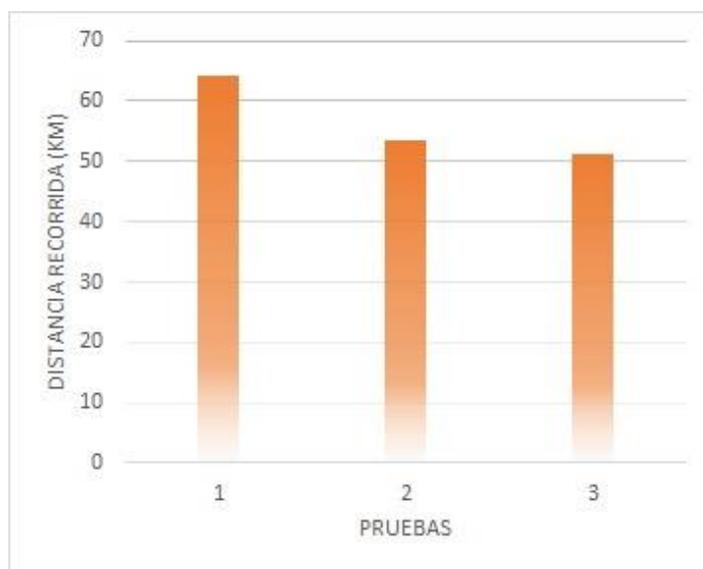
Como se puede observar en la figura 3.3 la autonomía de la batería es diferente con cada prueba, ya que a mayor velocidad de recorrido mayor consumo de energía. En la prueba 1 es posible alcanzar alrededor de 60 Km de autonomía, pero el tiempo de viaje es largo a diferencia de las pruebas 2 y 3 que su autonomía se encuentra cerca a los 49 km, pero el viaje es más rápido.



**Figura 3.3** Autonomía sin supercondensadores

### 3.4.2 AUTONOMÍA CON BATERÍA DE LITIO Y SUPERCONDENSADORES

En la figura 3.4 se observa que luego de realizar las 3 pruebas correspondientes con el uso del sistema desarrollado es posible obtener una autonomía de aproximadamente 65 km en la prueba 1, mientras que en la prueba 2 se alcanzan cerca de 54 km de autonomía y por último en la prueba 3 se tiene una autonomía de aproximadamente 50 km.



**Figura 3.4** Autonomía con supercondensadores

### 3.5 DISCUSIÓN DE LA AUTONOMÍA OBTENIDA CON EL SISTEMA DESARROLLADO

En la figura 3.5 se aprecia la comparación de la autonomía alcanzada después de cada prueba, empleando los supercondensadores en color azul y sin su aplicación en color verde.



**Figura 3.5** Comparación de autonomía

De acuerdo con la gráfica mostrada se puede definir que es notorio el aumento de autonomía con el empleo de supercondensadores, mostrando de tal forma que el empleo de estos elementos auxiliares y su funcionamiento de manera híbrida con la batería presenta una gran ventaja para promover un medio de transporte alternativo, viable y amigable para la sociedad y el medio ambiente.

En la tabla 3.4 se presentan los datos de incremento de autonomía, tanto en valores numéricos como en cantidades porcentuales analizadas después de realizar cada prueba correspondiente.

**Tabla 3.4** Aumento de autonomía

<b>Pruebas en autopista Otavalo-Ibarra</b>			
<b>Pruebas</b>	<b>Nivel de potencia del motor</b>	<b>Distancia incrementada</b>	<b>Autonomía incrementada (%)</b>
<b>1</b>	Tercero	4.4 km	7.36
<b>2</b>	Cuarto	5.35 km	11.10
<b>3</b>	Quinto	3.99 km	8.44

**Elaborado por:** Los autores

Mediante el análisis de la tabla 3.4 se diferencia el aumento de la autonomía con el uso del sistema implementado, para la prueba 1 se consigue un incremento de 4.4 km (7.36%), en la prueba 2 se alcanza un aumento de 5.35 km (11.10%), y en la prueba 3 se ha obtenido una ampliación de autonomía de 3.99 km (8.44%). Siendo la prueba más ventajosa la número 2 con una distancia de recorrido de 53.51 km, en un tiempo de 1h 51m 38 s, con velocidad promedio de 29 km/h es la que mejor beneficio ha presentado.

El porcentaje que aumenta es debido a la geografía del recorrido, ya que la prueba 1 y la prueba 3 no difiere mucho debido a que termina su recorrido en un terreno plano, mientras que la prueba 2 termina en un desnivel más prolongado, consiguiendo un mejor porcentaje de autonomía en este recorrido.

## CAPÍTULO IV

### 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

- El diseño del circuito electrónico se desarrolló mediante el programa “Proteus” el cual permite analizar y simular el circuito previo a su construcción real, evitando posibles daños y pérdidas tanto económicas como materiales; obteniendo un diseño conformado por un puente rectificador de diodos conectado en paralelo a los 3 módulos de supercondensadores de 16V y 1.6F, de los cuales se aprovecha la energía almacenada para cargar la batería de litio que tiene una capacidad de 12.5 Ah.
- Se implementó un sistema de propulsión para bicicletas eléctricas, el cual posee la función de freno regenerativo, con el fin de aprovechar la energía generada durante las frenadas, de esta manera se identificaron los 3 cables de fase; mismos que fueron conectados al puente de diodos construido a partir del diseño del circuito, almacenando esta energía en los supercondensadores de 1.6F de capacidad.
- El diseño elaborado posee dos funcionalidades que permiten al sistema trabajar con y sin los supercondensadores, a partir de estas, se estableció el análisis comparativo de autonomía, de los cuales se registró un aumento del 11.10% (5.35 km) con el uso de supercondensadores de 1.6F de capacidad, alcanzando el mejor desempeño en el cuarto nivel de velocidad proporcionado por el sistema de propulsión eléctrica.
- La relación peso-potencia existente en el vehículo eléctrico personal (bicicleta eléctrica) que tiene un peso total de 105 kg, se identifica un consumo de 4.15W por cada kg. Además, por cada gramo de los supercondensadores se incrementa 595 m de autonomía.
- Los supercondensadores inician el proceso de carga al disminuir el voltaje de la batería por debajo de los 36V, por lo tanto, se concluye que durante el periodo en el que la batería alcanza el voltaje mencionado, los supercondensadores mantienen una carga entre 36-37V.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Para próximas investigaciones se recomienda mejorar el diseño del circuito en cuestión a rectificación de la corriente y automatizar el control de carga y descarga de los supercondensadores.
- Para mejorar el sistema de generación de energía mediante freno regenerativo es recomendable utilizar el kit con motor de 1500W y batería de 48V, ya que posee un motor que genera mayor potencia aprovechando mejor el proceso de autoinducción generado durante la frenada regenerativa.
- El empleo de 3 módulos de supercondensadores conectados en serie, cada uno de 16V y 2.5F diseñado específicamente para vehículos eléctricos e híbridos los cuales proporcionan una mejor autonomía y mayor velocidad de carga de la batería, debido a que estos módulos presentan mayor capacidad de almacenamiento de energía de 56.25%.
- En trabajos futuros se recomienda una alternativa de diseño que incluya programar y construir un controlador para la gestión del motor de la bicicleta eléctrica o mejorar el circuito diseñado añadiendo un control del nivel de descarga de los supercondensadores.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamec, J., Danko, M., Taraba, M., & Drgona, P. (2019). Analysis of selected energy storage for electric vehicle on the lithium based. *Transportation Research Procedia*, 40, 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.021>
- Ambiental, I. (2017). *Facultad de ingenier í a*. 3–5.
- Bauzá, F. (2018). Estudio del sistema de frenado en los vehículos ligeros. *Universitat Politecnica de Catalunya*.
- Bueno, D. (2014). Motor Electrico. *Tipos Y Fundamentos*, 17. <https://1mecanizadoelarenal.files.wordpress.com/2014/11/motor-electrico.pdf>
- Catálogo de aplicaciones Baterías Bosch*. (n.d.).
- Cerpa Bernal, R. M., Mónico Muñoz, L. F., Cortés Ruiz, D. F., Mustafa Prieto, S. W., & Bonilla Candidata, A. (2016). Selección del sistema de propulsión de un vehículo urbano con bajo consumo de combustible. *Ingenium Revista de La Facultad de Ingeniería*, 17(33), 41. <https://doi.org/10.21500/01247492.2153>
- Chiriboga Cardenas, E. L., & Velasco Moyano, C. B. (2017). *Diseño e implementación de un sistema de freno regenerativo y transmisión eléctrica en una motocicleta convencional para la carrera de Ingeniería Automotriz*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/7658>
- Cuesta, G. (2017). *Caracterización del tren de potencia de un vehículo eléctrico de categoría L7 tipo Smart*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/108997/tfmguillermocuestafinal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ebel, F., & Nestel, S. (1993). Capítulo 1: Notas generales. *Sensores Para La Técnica de Procesos y Manipulación*, 1–28. [https://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/094342\\_leseprobe\\_es.pdf](https://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/094342_leseprobe_es.pdf)
- Emergentes, T., & Baterías, E. N. (2014). *INVESTIGACIÓN, DISEÑO Y PROTOTIPO DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA Y*. January 2013.

- Guarella, J., Heredia, J., Rodríguez, L., & Bagatto, I. (2011). Diseño y construcción de un banco de pruebas para el análisis de señales de los sensores y actuadores del automóvil por medio de un osciloscopio. *Universidad Nacional de La Plata*, 27. file:///C:/Users/Melisa/Downloads/APUNTE SENSORES Y ACTUADORES.pdf
- Hernandez Romero, A. (2016). Análisis económico de un sistema de almacenamiento para la disminución de desvíos de producción en un parque eólico. *Universidad De Sevilla*, 228.
- Heuberger, C. F., Bains, P. K., & Mac Dowell, N. (2020). The EV-olution of the power system: A spatio-temporal optimisation model to investigate the impact of electric vehicle deployment. *Applied Energy*, 257(August 2019), 113715. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113715>
- Hung, N. B., & Lim, O. (2020). A review of history, development, design and research of electric bicycles. *Applied Energy*, 260(December 2019), 114323. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114323>
- Iacobucci, R., McLellan, B., & Tezuka, T. (2019). Costs and carbon emissions of shared autonomous electric vehicles in a Virtual Power Plant and Microgrid with renewable energy. *Energy Procedia*, 156, 401–405. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.104>
- Jaume Martínez, B. (2017). Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas. *Etseib*. [http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/104855/TFG\\_Jaume\\_Martinez\\_Metodos\\_de\\_estimacion\\_del\\_estado\\_de\\_carga\\_de\\_baterias\\_electroquimicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/104855/TFG_Jaume_Martinez_Metodos_de_estimacion_del_estado_de_carga_de_baterias_electroquimicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Jones, T., Harms, L., & Heinen, E. (2016). Motives, perceptions and experiences of electric bicycle owners and implications for health, wellbeing and mobility. *Journal of Transport Geography*, 53, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.04.006>
- Kazimierski, M. A., & Kazimierski, M. A. (2018). Almacenamiento energético frente al inminente paradigma renovable: el rol de las baterías ion-litio y las perspectivas sudamericanas/Energy storage towards the imminent renewable paradigm: the role of ion-lithium batteries and South American perspectives. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 23, 108–132. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.23.2018.3055>

- Luengo, P., Mart, A., Codirector, I., Jos, F., & Gonz, A. (2013). *Sistema de ensayo y caracterización de Estudio de supercondensadores sometidos a radiación ionizante*. 1–25.
- Lyu, Y., Siddique, A. R. M., Majid, S. H., Biglarbegan, M., Gadsden, S. A., & Mahmud, S. (2019). Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling. *Energy Reports*, 5, 822–827. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.06.016>
- Marchese, R. A. (2018). *El Consumo de Combustible y Energía en el Transporte*. October.
- Martín Chicharro, G. J. (2016). PPT: Sistemas De Almacenamiento De Energía. *Presentation*, 1–133. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/18325/1/TFG-P-432.pdf>
- McGraw, H. (2011). Motores eléctricos 11. *Motores Eléctricos - McGraw-Hill*, 1. <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448173104.pdf>
- Ramírez Betancour, R., Valenzuela Murillo, F. A., Martínez Solís, F., Castañeda Hernández, C. E., Morfin Garduño, O. A., & Olmos Lopez, J. A. (2018). Control de velocidad de un motor de CD basado en mediciones de la corriente de armadura. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 19(4), 1–10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n4.039>
- Rodríguez, M. R. (2013). Mauricio riveros rodríguez. *Impacto De Un Parque Vehicular EléCtrico En Los Requerimientos De ReconfiguraciÓn De La Red De DistribuciÓn De La Ciudad De Santiago*.
- SENPLADES. (2017). Plan Nacional del Buen vivir 2017-2021. *Educational Research*, 1, 150. <http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/07/Plan-Nacional-para-el-Buen-Vivir-2017-2021.pdf>
- Supercondensadores, E. D. E. L. O. S., Viabilidad, Y. S. U., Sistema, C., & Fotovoltaicas, I. (2016). *Proyecto de Fin de Carrera Ingeniería Industrial*.
- Técnica, U., Norte, D. E. L., Por, E., & Vinicio, M. (2013). *Del norte*.
- Tecnología, F. D. E. C. Y., Ingeniería, E. D. E., Automotriz, M., Fernando, M., & Salcedo, C. (2014). *Director* :
- Upna. (2014). Control de un motor paso a paso. In *IngeniApp*. <http://ingeniapp.com/control-motor-paso-a-paso-con-raspberry-pi/>

Vargas Fabre, J. A. (2012). Conversión a Auto Eléctrico Basada En Un Accionamiento Trifásico: Diseño, Modelación E Implementación. *Tesis Conjunta, 1*, 91.

Yattah, C. (2015). *Estudio y caracterización de aleaciones tipo AB 2 como ánodos para baterías Ni-MH*. 86.  
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/8218/1/Uy24-17713.pdf>

Zeballos, R. P. (n.d.). *Influencia De La Presión De Inyección Combustible Y Estado*. 11, 17–21.

Zhang, J., Sun, W., Liu, Z., & Zeng, M. (2019). Comfort braking control for brake-by-wire vehicles. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 133(61773135), 106255.  
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106255>

## **ANEXOS**

## ANEXO I

## DATASHEET DEL SUPERCONDENSADOR



XP™ 2.7V 10F

BCAP0010 P270 X01

ESH5R-0010C0-002R7UC

Datasheet

## FEATURES

- Enhanced performance under adverse environmental conditions
- Patent pending improvements both in structure and in sealing
- Long lifetimes with up to 500,000 duty cycles\*
- Compliant with UL, RoHS, and REACH requirements

## Recommended Application:

Actuators, Emergency Lighting, Telematics, Automotive, Security Equipment, Backup System, Smoke Detectors, Advanced Metering, and Others

## ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Rated Voltage, $V_R$	2.7 VDC	
Surge Voltage <sup>1</sup>	2.85 VDC	
Rated Capacitance, $C^2$	10 F	
Capacitance Tolerance	Min. / Max.	-10% / +20%
	Average <sup>4</sup>	+5% / +10%
Initial DC-ESR, $R_{DC}$ <sup>3</sup>	Max.	30 mΩ
	Average <sup>4</sup>	20 mΩ
Maximum Leakage Current <sup>5</sup>	23 μA	
Maximum Peak Current, Non-repetitive <sup>6</sup>	10.3 A	

## TYPICAL LIFETIME CHARACTERISTICS\*

Projected DC Life at Room Temperature <sup>8</sup> (Continuous charging at $V_R$ and 25 ± 10 °C)	10 years
DC Life at Standard High Temperature <sup>8</sup> (Continuous charging at $V_R$ and 65 °C)	1,500 hours
DC Life at De-Rated Voltage & Higher Temp. <sup>8</sup> (Continuous charging at 2.3V and 85 °C)	1,500 hours
Projected Cycle Life at Room Temperature <sup>8</sup> (Constant current charge-discharge from $V_R$ to 1/2 $V_R$ at 25 ± 10 °C)	500,000 cycles
Biased Humidity Life (Continuous charging at $V_R$ , 60°C, and 90% RH)	2,500 hours
Shelf Life (Stored without charge at 25 ± 10 °C)	4 years

## TYPICAL THERMAL CHARACTERISTICS

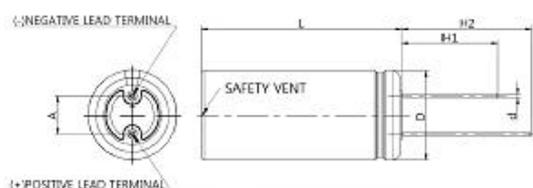
Thermal Resistance, $R_{th}$ (Housing)	42 °C/W
Thermal Capacitance, $C_{th}$	2.7 J/°C
Usable Continuous Current ( $\Delta T = 15^\circ C$ ) <sup>9</sup>	3.4 A
Usable Continuous Current ( $\Delta T = 40^\circ C$ ) <sup>9</sup>	5.6 A

## DIMENSION &amp; WEIGHT

D (+0.5)	10.0 mm	H1 (Min.)	15.0 mm
L (±1.0)	30.5 mm	H2 (Min.)	19.0 mm
d (±0.05)	0.6 mm	A (±0.5)	5.0 mm
Nominal Weight	3.2 g		

## SAFETY &amp; ENVIRONMENTAL

RoHS & REACH & UL	Compliant
-------------------	-----------

See Note on Mounting Recommendations<sup>10</sup>

## OPERATING ENVIRONMENT / POWER &amp; ENERGY

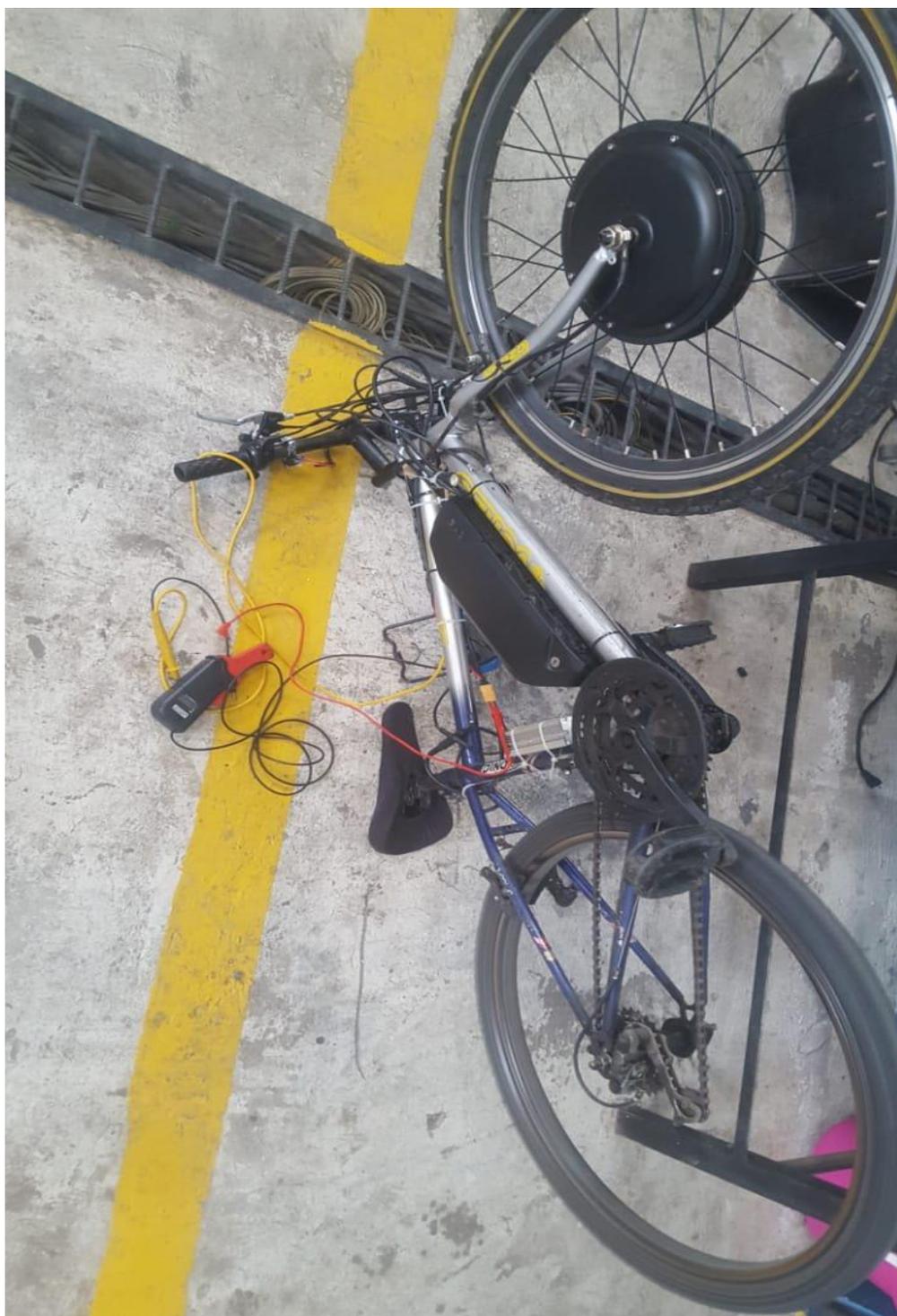
Operating Temperature Range	Standard (-40°C to 65°C)		Extended (-40°C to 85°C)	
Maximum Stored Energy, $E_{max}$ <sup>7</sup>	at 2.7V	10.1 mWh	at 2.3V	7.3 mWh
Gravimetric Specific Energy	at 2.7V	3.1 Wh/kg	at 2.3V	2.2 Wh/kg
Usable Specific Power <sup>7</sup>	at 2.7V	9.1 kW/kg	at 2.3V	6.6 kW/kg
Impedance Match Specific Power <sup>7</sup>	at 2.7V	18.9 kW/kg	at 2.3V	13.7 kW/kg

\*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details for applicable operating and use requirements.

Fuente: Microsoft Word - NCE\_2017\_Datasheet\_XP\_2.7V10F\_3001977-EN.1.docx

**ANEXO II**

**MEDICIONES DE PARÁMETROS CON LOS INSTRUMENTOS DE  
MEDIDA APROPIADOS**



## ANEXO III

### APLICACIÓN MÓVIL PARA REGISTRO DE DATOS DE LAS PRUEBAS

