



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA: INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR,  
MODALIDAD PRESENCIAL**

**TEMA:**

**“Construcción del sistema de carga de batería de litio para el vehículo fórmula SAE.”**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz**

**Línea de investigación:**

**AUTORES:**

**Muñoz Galindo Jonathan David**

**Toapanta Tapia Kevin David**

**DIRECTOR:**

**Ing. Erik Paúl Hernández Rueda, MSc.**

**Ibarra, junio 2024**

## CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 20 de junio de 2024

Ing. Paúl Hernández, MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

 (1) .....

*Ing. Paúl Hernández, MSc.*

*C.C: 1002978060*



## DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA 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>	DE	1724843097	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Y	Muñoz Galindo Jonathan David	
<b>DIRECCIÓN:</b>		Tabacundo/Pichincha/Ecuador	
<b>EMAIL:</b>		jdmunozg@utn.edu.ec	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	SN	<b>TELF. MÓVIL</b>	0987262436
DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	DE	1004718472	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Y	Toapanta Tapia Kevin David	
<b>DIRECCIÓN:</b>		Cotacachi/Imbabura/Ecuador	
<b>EMAIL:</b>		kdtoapantat@utn.edu.ec	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	SN	<b>TELF. MÓVIL</b>	0999646254

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	“CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CARGA DE BATERÍA DE LITIO PARA EL VEHÍCULO FÓRMULA SAE”.
<b>AUTOR (ES):</b>	Muñoz Galindo Jonathan David Toapanta Tapia Kevin David
<b>FECHA:</b>	2024/06/20
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
<b>CARRERA/PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	INGENIERO AUTOMOTRIZ
<b>DIRECTOR/ASESOR:</b>	Ing. Paul Hernández, MSc Ing. Ramiro Rosero, Msc

## CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) 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 es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 20 días, del mes de junio de 2024

### EL AUTOR(ES):

Firma.  .....

Nombre: Muñoz Galindo Jonathan David

Firma.  .....

Nombre: Toapanta Tapia Kevin David

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico con profunda gratitud y amor a mis padres, quienes han sido la roca firme en la que he encontrado refugio y fuerza a lo largo de mi vida. Su amor incondicional, su apoyo constante y sus enseñanzas han sido el faro que ha guiado mi camino. Gracias por inculcarme los valores del esfuerzo y la perseverancia, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por ser mi mayor fuente de inspiración. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

A mis queridos hermanos, por su inquebrantable compañerismo y por estar siempre a mi lado, llenando mi vida de ánimo y alegría. Sus palabras de aliento y su apoyo han sido fundamentales en cada paso de este arduo camino. Su presencia ha sido una fuente constante de motivación y fuerza.

A mis profesores y mentores, expreso mi más sincero agradecimiento por su guía y enseñanzas. Su dedicación y sabiduría han sido pilares esenciales en mi formación académica y personal. Gracias por desafiarme a superar mis límites y por brindarme las herramientas necesarias para alcanzar mis metas. Sus lecciones trascienden el aula y han dejado una huella imborrable en mi vida.

Y finalmente, a todos aquellos que de una u otra forma han contribuido a que este sueño se haga realidad, les extiendo mi gratitud. A amigos, familiares y colegas, su apoyo y confianza en mí han sido cruciales en este proceso. Cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo, han sido el combustible que me ha impulsado a seguir adelante.

Esta tesis es el resultado de un esfuerzo colectivo, de la suma de muchos actos de bondad y generosidad. A todos ustedes, de corazón, gracias.

**Jonathan Muñoz**

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico a mi madre, Alicia Tapia, a quien le tengo un profundo agradecimiento por todo el apoyo y la ayuda que me ha brindado a lo largo de este camino académico. Tu cariño y tus palabras de aliento han sido fundamentales. Gracias por enseñarme que con esfuerzo todo es posible.

A mi padre, Juan Toapanta, quien ha sido mi inspiración para llegar lejos. Con cada uno de tus consejos y palabras de apoyo, me has impulsado a mirar siempre hacia adelante y a dejar los problemas en el pasado.

A mis hermanos, Juan Diego y Anghelo, quienes son parte integral de este sueño. Gracias a ustedes, cada día me esfuerzo por ser un mejor hermano.

Finalmente, a todas las personas y familiares que han estado a mi lado en este largo camino, contribuyendo con su granito de arena en el transcurso de mis estudios. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

**Kevin Toapanta**

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por concederme salud, fortaleza y por permitirme alcanzar una nueva meta en mi vida. Su guía y protección han sido esenciales en cada paso de este proceso.

Quiero extender mi más sincero agradecimiento a mi padre, Reinaldo Muñoz, quien ha sido un pilar fundamental en mi camino hacia la realización de mis estudios de tercer nivel. Su sabiduría, dedicación y apoyo incondicional me han dado la fuerza necesaria para superar cada desafío.

A mi madre, Mariela Galindo, le agradezco profundamente por su apoyo inquebrantable y por depositar su confianza en mí en todo momento. Su amor y sacrificio han sido la base sobre la cual he construido mis sueños. Su presencia constante y sus palabras de aliento han sido mi motor para seguir adelante.

No puedo dejar de reconocer el invaluable apoyo de mis hermanos, Mireya y Estiven. Ustedes, que representan el núcleo de mi afecto, han sido mis constantes motivadoras en cada etapa de este viaje. Su amor, comprensión y aliento han sido fundamentales para evitar que desfalleciera en el camino. Cada palabra de aliento y cada gesto de cariño han sido un impulso constante para no rendirme.

A la Srta. Ximena Peñafiel, mi agradecimiento eterno por su amor, paciencia y por ser mi compañera en esta aventura. Gracias por estar a mi lado en cada momento, celebrando mis logros y brindándome consuelo en los desafíos. Tu apoyo incondicional y tu presencia constante han hecho este camino mucho más llevadero.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que, de una u otra forma, han contribuido a la realización de esta tesis.

**Jonathan Muñoz**

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer sinceramente a mi tutor, MSc. Paul Hernandez, por su paciencia y guía constante a lo largo de este proyecto. Su dedicación y conocimientos fueron fundamentales para alcanzar este logro. También agradezco a mi asesor, MSc. Ramiro Rosero, cuya orientación, experiencia y apoyo continuo fueron clave en cada etapa del proceso y en la culminación de este trabajo. Agradezco profundamente a la Universidad Técnica del Norte, la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, y la carrera de Ingeniería Automotriz, así como a los docentes que, con paciencia y esmero, impartieron sus conocimientos y contribuyeron a mi formación académica.

A mis padres y hermanos, quiero expresarles mi infinita gratitud. Sin ustedes, nada de esto hubiera sido posible. Su apoyo incondicional, confianza y presencia constante a lo largo de este largo camino han sido pilares fundamentales para alcanzar este objetivo.

A mi tío, Alfredo Tapia, le agradezco por su sabiduría y paciencia al guiarme en el arte de la mecánica. Sus enseñanzas han sido invaluable para mi desarrollo personal y profesional.

Finalmente, no puedo culminar sin agradecer a Priscila Imbat, quien ha estado presente desde el inicio de mi carrera universitaria. Su cariño, sus valiosas contribuciones, palabras de aliento y apoyo incondicional han sido una fuente constante de motivación y fortaleza.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este logro no habría sido posible sin su apoyo y contribución.

**Kevin Toapanta**



## RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de investigación hace referencia a “Construcción del sistema de carga de batería de litio para el vehículo fórmula SAE”. basado en la necesidad de maximizar la eficiencia y el rendimiento del vehículo; este trabajo tiene como objetivo principal: Dimensionar e implementar un sistema de carga compuesto por un paquete de baterías de litio, destinado específicamente para su integración en un vehículo de competición de la Fórmula SAE, con la finalidad de mejorar la eficiencia y reducir peso con respecto a las de plomo. La construcción de la batería de litio se comenzó realizando los cálculos óptimos y el estudio de la batería de litio, con los cálculos obtenidos realizamos el ensamble utilizando celdas conectadas en serie y en paralelo, con el fin de tener el voltaje nominal y el amperaje para poder abastecer a los motores eléctricos Brushless. Una vez construidas las baterías fueron adaptadas al vehículo formula SAE para poder realizar las pruebas basadas en el reglamento de formula SAE 2024, con el fin de garantizar los resultados obtenidos; se realizó diferentes tipos de pruebas con las cuales se realizó una comparación de funcionamiento del vehículo con baterías de plomo y de litio, en donde se tomó en cuenta la aceleración, tiempo de carga y de descarga, autonomía y maniobrabilidad, el resultado de estas pruebas usando las baterías de litio en el vehículo formula SAE fueron: velocidad máxima de 35.25 km/h después de 75 m en 11.81 segundos en la prueba de aceleración, en la prueba de maniobrabilidad la velocidad máxima fue de 36 km/h en 16.08 segundos. La prueba que más se destaca es la eficiencia en tiempo de descarga sobrepasando con más del 50% a las baterías de plomo. Con estos resultados se concluyó que en todas las pruebas realizadas tenemos mejores resultados usando las baterías de litio cumpliendo con el objetivo principal.

**Palabras claves:** Formula SAE, baterías de plomo, baterías de litio, eficiencia, rendimiento, pruebas.

## ABSTRACT

The present research work refers to the “Construction of a lithium battery charging system for a Formula SAE vehicle” based on the need to maximize the efficiency and performance of the vehicle. The main objective of this work is to design and implement a charging system composed of a lithium battery pack, specifically intended for integration into a Formula SAE competition vehicle, with the aim of improving efficiency and reducing weight compared to lead batteries.

The construction of the lithium battery began with performing optimal calculations and studying the lithium battery. Based on the obtained calculations, we assembled the battery using cells connected in series and parallel to achieve the nominal voltage and amperage needed to power the Brushless electric motors. Once constructed, the batteries were adapted to the Formula SAE vehicle to conduct tests based on the Formula SAE 2024 regulations to ensure the obtained results.

Various types of tests were conducted to compare the vehicle's performance with lead and lithium batteries, considering acceleration, charging and discharging time, range, and maneuverability. The results of these tests using lithium batteries in the Formula SAE vehicle were a maximum speed of 35.25 km/h after 75 meters in 11.81 seconds in the acceleration test, and a maximum speed of 36 km/h in 16.08 seconds in the maneuverability test. The most notable test result is the efficiency in discharge time, surpassing lead batteries by more than 50%.

These results led to the conclusion that in all the tests conducted, we achieved better results using lithium batteries, fulfilling the main objective.

**Keywords:** Formula SAE, lead-acid batteries, lithium batteries, efficiency, performance, tests.

**LISTA DE SIGLAS**

**EV.** Vehículos eléctricos

**HEV.** Vehículos eléctricos híbridos

**PHEV.** Vehículos eléctricos enchufables

**FCEV.** Vehículos eléctricos de pila de combustible

**BEV.** Vehículos eléctricos de baterías

**BMS.** Sistema de gestión de baterías

**LFP.** Baterías de Fosfato de Hierro y Litio

**NMC.** Baterías de Litio Níquel Manganeso Óxido de Cobalto

**NCA.** Baterías de Litio Níquel Cobalto Óxido de Aluminio

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPITULO I</b> .....	15
1. Revisión Bibliográfica .....	15
1.1 Antecedentes:.....	15
1.2 Situación Actual:.....	16
1.3 Prospectiva:.....	17
1.4 Planteamiento del Problema: .....	17
1.5 Objetivos.....	18
1.5.1 Objetivo General.....	18
1.5.2 Objetivos Específicos.....	18
1.6 Alcance .....	18
1.7 Justificación .....	19
1.8 Contexto.....	20
1.9 Marco Teórico.....	21
1.9.1 Formula SAE .....	21
1.9.2 Objetivo de la competencia.....	21
1.9.3 Clases de Vehículos .....	21
1.9.4 Prototipos de VE.....	22
1.9.5 Principios Básicos.....	23

1.9.6	Fundamentos y Características eléctricas. ....	24
1.9.7	Rendimiento y Salud de las Baterías .....	25
1.9.8	Aspectos Fundamentales de la Energía.....	26
1.9.9	Configuraciones en serie y paralelo de las baterías .....	28
1.9.10	Tipos de baterías de Litio.....	30
1.9.11	Composición Química de una Batería de Litio.....	34
1.9.12	Sistema de seguridad en baterías .....	35
<b>CAPÍTULO II</b> .....		<b>38</b>
2.	<b>MATERIALES Y METODOLOGÍA</b> .....	<b>38</b>
2.1	Metodología .....	38
2.1.1	Análisis de Necesidades.....	39
2.1.2	Requisitos del banco de baterías para EV Formula SAE.....	40
2.1.3	Cálculo/ Dimensionamiento del tren de potencia .....	40
2.1.4	Selección/ Cálculo del paquete de baterías .....	42
2.1.5	Acople del paquete de baterías .....	45
2.2	Materiales y Equipos.....	46
2.2.1	Acople Celdas/ modulo/ Pack.....	46
2.2.2	Acople del Sistema de gestión de baterías .....	49
2.2.3	Materiales y equipos .....	50
2.2.4	Acople BMS.....	51

2.2.5	Ensamble Sensores y aisladores.....	52
2.2.6	Funcionamiento de la interfaz del BMS .....	52
2.3	Validación con pruebas dinámicas.....	54
2.3.1	Prueba piloto .....	54
2.3.2	Evento de aceleración .....	56
2.3.3	Evento de deslizamiento .....	57
2.3.4	Prueba de autonomía.....	58
<b>CAPITULO III.....</b>		<b>59</b>
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	59
3.1	Resultados.....	59
3.1.1	Definición de necesidades.....	59
3.1.2	Selección del Pack de baterías y BMS.....	60
3.1.3	Acople del banco de pruebas .....	62
3.1.4	Pruebas Formula SAE.....	64
3.2	Discusión.....	67
3.2.1	Consideraciones del dimensionamiento.....	67
3.2.2	Selección de la batería .....	68
3.2.3	Comparativa de pruebas de la Formula SAE.....	73
<b>CAPITULO IV.....</b>		<b>77</b>
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	77

4.1	Conclusiones .....	77
4.2	Recomendaciones .....	78
	REFERENCIAS.....	80
	ANEXOS .....	87
1.1	ANEXO I .....	87
1.2	ANEXO II.....	89
1.3	ANEXO III.....	91
1.4	ANEXO IV .....	92

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Reacción electroquímica de la batería de fosfato de hierro y litio.....	30
<b>Tabla 1.2</b> Especificaciones de Batería (LiFePo4).....	31
<b>Tabla 1.3</b> Reacción electroquímica de la batería NMC .....	32
<b>Tabla 1.4</b> Especificaciones de Batería NMC. ....	32
<b>Tabla 1.5</b> Reacción electroquímica de la batería NCA.....	33
<b>Tabla 1.6</b> Especificaciones de Batería (LiNiCoAlO <sub>2</sub> ).....	34
<b>Tabla 1.7</b> Componentes, Funciones, Materiales de una Batería de Litio.....	35
<b>Tabla 2.1</b> Requisitos Formula SAE 2024.....	40
<b>Tabla 2.2</b> Datos generales del EV .....	41
<b>Tabla 2.3</b> Ecuaciones de Resistencia (N).....	42
<b>Tabla 2.4</b> Ecuaciones de Potencias (kW).....	42
<b>Tabla 2.5</b> Motor instalados en el EV.....	43
<b>Tabla 2.6</b> Ecuaciones para el dimensionamiento del paquete de baterías .....	44
<b>Tabla 2.7</b> Especificaciones de la batería ROOFER .....	46
<b>Tabla 2.8</b> Características BMS.....	50
<b>Tabla 2.9</b> Revisión de Seguridad .....	55
<b>Tabla 2.10</b> Revisión de Ruedas y neumáticos.....	55
<b>Tabla 3.1</b> Resistencias y Potencias .....	59
<b>Tabla 3.2</b> Necesidades de la batería.....	60
<b>Tabla 3.3</b> Datos Evento de Aceleración.....	65
<b>Tabla 3.4</b> Datos Evento de deslizamiento.....	65



## ÍNDICE DE FIGURA

<b>Figura 1.1</b> Sistema de apagado .....	22
<b>Figura 1.2</b> Batería recargable de iones de litio .....	24
<b>Figura 1.3</b> Indicaciones de conexión en serie .....	28
<b>Figura 1.4</b> Indicaciones de Conexión en Paralelo.....	29
<b>Figura 1.5</b> Indicaciones de Conexión Serie/Paralelo .....	30
<b>Figura 1.6</b> Composición de una batería de litio .....	34
<b>Figura 2.1</b> Flujograma general de la metodología .....	38
<b>Figura 2.2</b> Flujograma de la selección de las baterías .....	39
<b>Figura 2.3</b> Análisis del funcionamiento de un banco de baterías .....	45
<b>Figura 2.4</b> Diagrama de soldadura con níquel en paralelo y serie.....	47
<b>Figura 2.5</b> Construcción del Banco de Baterías.....	48
<b>Figura 2.6</b> Batería antes de soldar.....	48
<b>Figura 2.7</b> Diagrama de cableado .....	49
<b>Figura 2.8</b> Acople del BMS .....	51
<b>Figura 2.9</b> Aplicación móvil de BMS.....	53
<b>Figura 2.10</b> Batería siendo balanceada .....	53
<b>Figura 2.11</b> Prueba piloto.....	56
<b>Figura 2.12</b> (1) Zona del evento de Aceleración (2) Ubicación del EV .....	56
<b>Figura 2.13</b> Pista Formula SAE .....	57
<b>Figura 2.14</b> (1) Al inicio (2) proceso (3) al final .....	58
<b>Figura 3.1</b> Batería de litio seleccionada para acoplar en el EV .....	61
<b>Figura 3.2</b> BMS seleccionado para el control del pack de baterías .....	61

<b>Figura 3.3</b> Organización de celdas serie y paralelo .....	62
<b>Figura 3.4</b> Implementación de BMS.....	63
<b>Figura 3.5</b> Desbalance de celdas.....	63
<b>Figura 3.6</b> Esquema eléctrico de conexiones.....	64
<b>Figura 3.7</b> Relación entre voltaje y SOC .....	66
<b>Figura 3.8</b> Parámetros principales a cumplir antes de seleccionar. ....	68
<b>Figura 3.9</b> Sistemas de almacenamiento de energía de baterías .....	69
<b>Figura 3.10</b> Densidad de energía específica y densidad de energía volumétrica .....	70
<b>Figura 3.11</b> Corriente Constante y Voltaje Constante (CCCV .....	71
<b>Figura 3.12</b> Nuevo diseño del vehículo .....	72

## CAPITULO I

### 1. Revisión Bibliográfica

#### 1.1 Antecedentes:

En 1981, SAE International inauguró la competencia estudiantil Fórmula SAE, que ha experimentado una expansión global con más de 20 eventos [1]. Diseñada para preparar a estudiantes en la industria de la movilidad, la competencia evalúa prototipos de autos de carrera a través de pruebas estáticas (inspección técnica, costo y fabricación, presentación, diseño) y dinámicas (conducción, condiciones climáticas, llantas, limitaciones del conductor, aceleración, derrape, resistencia, eficiencia), centrándose en aspectos de producción, rendimiento y durabilidad [2, pp. 3-5]. Respondiendo a la creciente demanda y costos del petróleo, y considerando el impacto ambiental de los motores de combustión interna, en 2013, la competición Fórmula SAE introdujo una categoría para vehículos completamente eléctricos, promoviendo así el interés de los estudiantes en la movilidad eléctrica [3].

Desde la comercialización de las baterías de iones de litio, se han logrado enormes avances para aumentar la densidad de energía, reducir los costos y mejorar el rendimiento de las baterías [4, p. 512]. Los avances en la tecnología de las baterías impulsan el desarrollo de los vehículos eléctricos (EV) clasificados en: (i) vehículos eléctricos híbridos (HEV), (ii) vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV), (iii) vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) y (iv) vehículos totalmente eléctricos o vehículos eléctricos de batería (BEV) [5]. Las LIB han sido ampliamente adoptadas en HEV y BEV debido a las ventajas proporcionadas por el litio a temperatura ambiente, incluyendo alta eficiencia energética, elevada potencia específica, largo ciclo de vida y parámetros como energía específica (Wh/ kg) entre 120 y 300, potencia específica (W/kg) entre 200 y 450, y ciclo de vida de 600 a más de 3000 [6, p. 7].

Aunque las LIB ofrecen una impresionante potencia en proporción a su tamaño, su intrínseca inestabilidad requiere precauciones cruciales, evitar la sobre carga y descarga total, es vital, demandando una constante vigilancia del voltaje y corriente; la complejidad aumenta en vehículos eléctricos, donde múltiples celdas se agrupan en un pack, necesitando un monitoreo individual para seguridad y eficiencia, este control especializado recae en el Sistema de Gestión de Baterías (BMS) [7, p. 4]. El BMS supervisa o estima las condiciones de la batería, incluyendo voltaje, corriente, predicciones de alcance, salud y capacidad de energía. Parámetros clave como estado de carga (SOC), salud (SOH) y función (SOF) son esenciales para evaluar el rendimiento global del BMS [8, p. 1]. Un paquete de baterías eficaz, especialmente en condiciones climáticas adversas, puede significativamente potenciar el rendimiento y utilidad de vehículos eléctricos en regiones frías como Canadá, fomentando la aceptación del consumidor y acelerando la transición hacia metas de reducción de emisiones y neutralidad de carbono [9, p. 12].

## **1.2 Situación Actual:**

La Fórmula SAE ha publicado las normativas para la competición del 2024, destacando pautas en pruebas estáticas y dinámicas. En la estática, la potencia máxima no debe exceder 80 kW, y el voltaje entre puntos no debe superar los 600 V CC. El tren motriz no debe regenerar energía a velocidades entre 0 y 5 km/h [2, pp. 90-91]. En la prueba dinámica, la resistencia implica múltiples vueltas en un recorrido cerrado de aproximadamente 22 km, con velocidades promedio de 48-57 km/h y máximas de alrededor de 105 km/h [2, p. 134]. El evento de eficiencia evalúa el combustible/energía utilizada, considerando el tiempo y la distancia. Se aplican conversiones como "EV 0,65 kg de CO<sub>2</sub> por kWh" [2, p. 138].

En vehículos eléctricos modernos, se emplean tres principales materiales anódicos en las baterías: fosfato de hierro y litio (LFP), óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio (NCA), y óxido

de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC) [10], [11], [12]. El sistema de gestión térmica de la batería es crucial para los EV, siendo vital investigar el rango de temperatura óptima durante ciclos de carga/descarga y su gestión [9, p. 4]. Mantener la temperatura entre 25 °C y 40 °C es esencial para prevenir fugas térmicas que podrían desencadenar incendios en los paquetes de baterías, asegurando la longevidad y seguridad de la batería en vehículos eléctricos [13].

### **1.3 Prospectiva:**

Superar los desafíos en tecnología de baterías requerirá equilibrar rendimiento, vida útil, costo y seguridad. La simulación computacional acelerará el diseño sistemático, desde materiales hasta sistemas completos. Avances en infraestructura de carga y regulaciones gubernamentales también serán clave para impulsar la adopción masiva de vehículos eléctricos, creando un futuro sostenible y eficiente en la movilidad eléctrica [4, p. 511]. El proyecto busca implementar un Sistema de Carga de Baterías (Pack de baterías) en un monoplaza eléctrico. Reemplazando las baterías de plomo por baterías de litio. Con el fin de llegar a un escenario del aumento de la autonomía del VE.

### **1.4 Planteamiento del Problema:**

La prohibición progresiva de vehículos con motores de combustión interna plantea desafíos para la industria automotriz y la infraestructura, ya que diferentes países establecen fechas límite divergentes, generando complejidades logísticas y tecnológicas [5, p. 8]. El desarrollo de vehículos eléctricos se enfrenta al desafío de perfeccionar sistemas de gestión de batería (BMS) eficientes. Estos deben garantizar la optimización del rendimiento, la seguridad y funciones cruciales, como el seguimiento de parámetros y el cálculo del estado de carga, para asegurar un funcionamiento correcto y una desconexión segura en condiciones inusuales, motivando la continua investigación en esta área vital para la tecnología de vehículos eléctricos.

Las baterías de plomo tienen una densidad de energía baja, perdiendo mayor energía en el proceso de carga y descarga, aumentando sus costos de mantenimiento al ser cambiada con mayor frecuencia que las de litio.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Construir un sistema de carga de baterías de litio para un vehículo de formula SAE con motores independientes.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Definir las necesidades del paquete de baterías mediante un dimensionamiento del tren de potencia.
- Calcular el paquete de baterías para seleccionar el tipo de celda que será acoplada en el paquete con el BMS, asegurando su compatibilidad con las necesidades del motor.
- Acoplar un sistema de carga de baterías (Paquete de baterías) que satisfaga de forma óptima las especificaciones establecidas.
- Analizar los resultados de los eventos dinámicos de la Formula SAE entre las baterías de litio y las baterías de plomo.

## **1.6 Alcance**

La implementación de un paquete de baterías en un monoplaza eléctrico diseñado por [16]. El objetivo de este proyecto fue mejorar la autonomía y velocidad del vehículo, cumpliendo con las normas de la competición. Para ello, se realiza un análisis de necesidades del monoplaza y del paquete de baterías, estableciendo un criterio de calidad para el análisis técnico y económico que

permita seleccionar las celdas cilíndricas más adecuadas. Se ensambla el paquete de baterías con el BMS y, finalmente, se valida el ensamble. Para ello, se llevan a cabo pruebas en un circuito cerrado, siguiendo los parámetros establecidos en el reglamento Formula SAE 2024 Versión 1.0. Los resultados de estas pruebas se comparan con los resultados de la tesis anterior, evaluando la eficacia del proyecto.

### **1.7 Justificación**

Los vehículos con motores de combustión interna generan el 18% de partículas en suspensión, el 27% de sustancias orgánicas volátiles, el 28% de Pb, el 32% de óxidos de nitrógeno y el 62% de CO en la contaminación atmosférica en América. Además, representan el 25% de todo el  $CO_2$  vinculado a la energía y son el principal contribuyente al efecto invernadero. El aumento del uso de transporte público y privado contribuye al incremento diario de la contaminación, impulsando la creciente popularidad de los vehículos eléctricos [14].

Las baterías de iones de litio (LIB) son líderes en dispositivos electrónicos, almacenamiento de energía y automóviles, superando a tecnologías previas y posteriores al litio. Las baterías de plomo y níquel, así como las de iones de sodio (SIB), presentan desventajas como menor densidad y energía específica en comparación con las avanzadas LIB. Esto impulsa la dominancia de las LIB en el mercado [6, p. 4].

El Plan de Creación de Oportunidades para el 2030 busca “diversificar las fuentes de energía siguiendo criterios de eficiencia y sostenibilidad ambiental. Se buscará lograr un equilibrio entre fuentes de energía renovables y no renovables. La transición energética, respaldada por tecnologías modernas y limpias, se establecerá como la estrategia clave para superar la dependencia de las energías fósiles”. Implementando dentro de su eje económico en la política 3.1

del objetivo 3 “Mejorar la competitividad y productividad industrial, incentivando el acceso a infraestructura adecuada, insumos y uso de tecnologías modernas y limpias”. [15, pp. 25-56]

La investigación se enfocará en implementar un banco de baterías para un monoplaza eléctrico. Reemplazando las baterías de plomo por baterías de litio, para el análisis de la autonomía y velocidad del monoplaza con los resultados de la investigación de [16] para determinar si el monoplaza es más eficiente y en qué porcentaje.

### **1.8 Contexto**

La implementación de un BMS es indispensable en las baterías de litio mejora el control y vida de las baterías, las baterías de litio tienen mayor densidad de energía, vida útil, eficiencia y rendimiento que las baterías de plomo.

Según [16] dice que: los requisitos de la normativa Fórmula SAE 2021 exigían una autonomía mínima de 22 km y una velocidad promedio de 45 km/h. Tras realizar cálculos, se determinó que se necesitan 2 motores sin escobillas de 2000 W cada uno y 10 baterías de 12 V y 12 A, de plomo. Estas se conectan en serie-paralelo, alcanzando 60 V y 24 A, cumpliendo con los estándares. El prototipo logra una velocidad máxima de 52.47 km/h y una autonomía de 28.8 km. En las pruebas, se destaca una aceleración en 75 m, velocidad máxima promedio de 32.3 km/h en 12.17 s y maniobrabilidad de 22.6 km/h en 36.72 s. La simulación y análisis arrojan valores como velocidad máxima de 54.5 km/h, torque máximo de 72.56 Nm y potencia de 6,54 kW (8.77 HP) con baterías en su capacidad máxima.



## **1.9 Marco Teórico**

### **1.9.1 Formula SAE**

En 1981, SAE International inauguró la competencia estudiantil Fórmula SAE, que ha experimentado una expansión global con más de 20 eventos [1].

### **1.9.2 Objetivo de la competencia**

Diseñada para preparar a estudiantes en la industria de la movilidad, la competencia evalúa prototipos de autos de carrera a través de pruebas estáticas (inspección técnica, costo, fabricación, presentación y diseño) y dinámicas (conducción, condiciones climáticas, llantas, limitaciones del conductor, aceleración, derrape, resistencia, eficiencia), centrándose en aspectos de producción, rendimiento y durabilidad [2, pp. 3-5].

### **1.9.3 Clases de Vehículos**

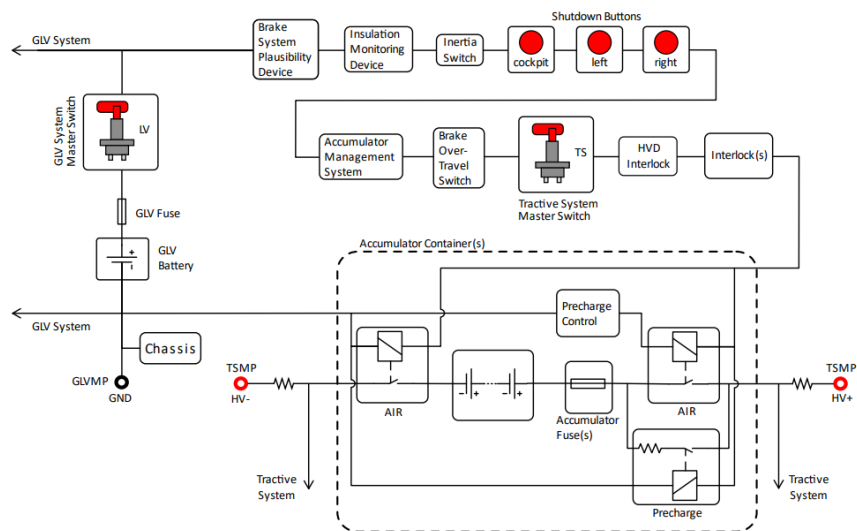
Actualmente, existen tres categorías de vehículos: combustión, eléctricos y sin conductor. Las dos primeras son populares en competiciones por sus sistemas de propulsión, mientras que la tercera destaca por prescindir de un piloto a bordo ([17]. Tomando en consideración que después de las categorías existen procesos de fabricación del monoplaza que se dividen en tres clases ([18].

- *Clase tres*: Forman parte los equipos nuevos que están diseñando su prototipo y es la primera validación donde se evalúa pruebas de diseño, prestaciones y costes.
- *Clase dos*: Equipos que fueron aprobados en la categoría anterior y el vehículo este fabricado completamente. Se evalúa diseño, presentación y coste.
- *Clase uno*: Equipos con prototipos funcionales pueden competir hasta 12 meses desde su primera participación. Deben actualizar sus monoplazas, introduciendo

cambios en suspensión, chasis, carrocería o sistema eléctrico para mantener la competitividad.

### 1.9.4 Prototipos de VE

Respondiendo a la creciente demanda y costos del petróleo, y considerando el impacto ambiental de los motores de combustión interna, en 2013, la competición Fórmula SAE introdujo una categoría para vehículos completamente eléctricos, promoviendo así el interés de los estudiantes en la movilidad eléctrica [3].



**Figura 1.1** Sistema de apagado

La **Figura 1.1** muestra el sistema de apagado base que deberán cumplir los monoplazas EV, también existen otras normativas para competir en las pruebas estática, la potencia máxima no debe exceder 80 kW, y el voltaje entre puntos no debe superar los 600 V CC. El tren motriz no debe regenerar energía a velocidades entre 0 y 5 km/h [2, pp. 90-91]. En la prueba dinámica, la resistencia implica múltiples vueltas en un recorrido cerrado de aproximadamente 22 km, con velocidades promedio de 48-57 km/h y máximas de alrededor de 105 km/h [2, p. 134].

## **1.9.5 Principios Básicos**

### **1.9.5.1 Celda**

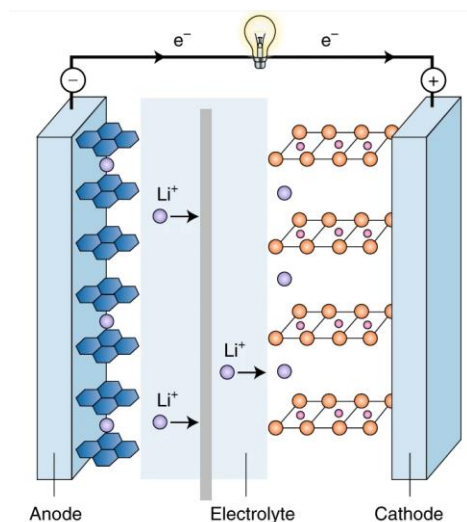
La unidad más elemental de una batería consta de un electrodo positivo, uno negativo, un separador y un electrolito, lo que le permite almacenar energía eléctrica. Esta unidad básica, cuando se aloja en un contenedor y se equipa con conexiones eléctricas, constituye la esencia de una batería. La capacidad de una celda está relacionada con su tamaño, mientras que su voltaje depende del sistema electroquímico del dispositivo [19].

### **1.9.5.2 Baterías**

Una batería es un dispositivo que almacena energía química y la convierte en electricidad cuando es necesario. Compuesta por celdas electroquímicas, incluye un ánodo, un cátodo y un electrolito. Se utiliza en diversos dispositivos para proporcionar energía portátil y almacenamiento temporal de electricidad.

### **1.9.5.3 Baterías recargables**

Las baterías recargables son dispositivos electroquímicos que almacenan y liberan energía mediante reacciones químicas reversibles, permitiendo su recarga para un uso sostenible y eficiente en diversos dispositivos electrónicos [20], el funcionamiento de las baterías recargables de iones de litio se muestra en la **Figura 1.2**.



**Figura 1.2** Batería recargable de iones de litio

[20]

Funcionan mediante reacciones químicas reversibles que permiten el flujo de electrones entre el ánodo y el cátodo. Durante la descarga, se libera energía química convirtiéndose en energía eléctrica. Durante la carga, esta reacción es revertida, almacenando nuevamente la energía en forma química. La tecnología y química específicas varían según el tipo de batería, como las de ion de litio, níquel-metal hidruro (Ni-MH), o de ion de sodio. [20].

## 1.9.6 Fundamentos y Características eléctricas.

### 1.9.6.1 Voltaje Nominal

El voltaje nominal de una carga eléctrica, como una batería, generador o red eléctrica, representa la diferencia de potencial específica definida por el fabricante o proveedor para ese dispositivo en particular. A menos que se especifique lo contrario, este valor se expresa en RMS (Root Mean Square, valor eficaz), y sirve como referencia estándar para el funcionamiento normal y seguro del dispositivo eléctrico [21].

### 1.9.6.2 Voltaje de Celda

El voltaje de la celda es la diferencia de potencial generada entre las placas positiva y negativa dentro del electrolito. Estos niveles de potencial están influenciados por los materiales de las placas, el tipo de electrolito y su concentración. Es importante destacar que el voltaje de la celda no es estático, sino que varía en función del estado de carga, determinado por la densidad del electrolito, así como por la temperatura de este[19].

### 1.9.6.3 Capacidad

Se refiere a la cantidad de energía que un dispositivo de almacenamiento puede retener y suministrar durante un periodo específico. Se suele medir en amperios-hora (Ah) o en vatios-hora (Wh)[22]

## 1.9.7 Rendimiento y Salud de las Baterías

### 1.9.7.1 Estado de carga

El Estado de Carga (SOC) es una medida relativa que indica la cantidad de energía almacenada en una batería en un momento dado. Esta medida se expresa en porcentaje para representar el nivel actual de carga de la batería, donde el 100% denota que la batería ha alcanzado su capacidad máxima de almacenamiento de energía[23].

$$\text{SOC}(\%) = \frac{\text{Voltaje de la batería} - \text{Voltaje mínimo}}{\text{Voltaje total} - \text{Voltaje mínimo}} * 100 \quad \text{Ecuación [1]}$$

### 1.9.7.2 Estado de salud (SOH)

El estado de salud (SOH) de una batería indica su diferencia de desempeño entre estar nueva y ser usada, considerando su envejecimiento. Se calcula como la proporción entre la carga máxima actual de la batería y su capacidad nominal original. El SOH, inicialmente al 100 %, disminuye con el tiempo debido a la pérdida gradual de capacidad, lo que acelera el agotamiento

de la batería. Aunque el SOH disminuye gradualmente, el estado de carga (SOC) puede aún alcanzar el 100 % cuando la batería se carga por completo[24].

$$\text{Estado de salud (\%)} = \frac{\text{Capacidad Actual}}{\text{Capacidad Nominal}} * 100 \quad \text{Ecuación [2]}$$

### 1.9.7.3 Ciclo de vida

La vida útil de una batería se define por el número de ciclos de carga y descarga que puede experimentar antes de que su rendimiento alcance ciertos criterios establecidos. Cuando se descargan las baterías regularmente a un porcentaje menor, se logran más ciclos útiles en comparación con descargas frecuentes hasta su máxima profundidad. Esto significa que preservar la batería, evitando descargas profundas con frecuencia, prolongará su vida útil[25].

$$\text{Ciclo de vida} = \frac{\text{Capacidad Nominal (mAh)}}{\text{Carga/descarga Diaria (mAh)}} * \frac{\text{Ciclo de carga}}{\text{Descarga}} \quad \text{Ecuación [3]}$$

### 1.9.7.4 Autodescarga

La autodescarga representa la velocidad a la que una batería pierde su carga cuando no está en uso. Este factor es crucial ya que puede impactar considerablemente tanto el rendimiento como la vida útil de la batería. Cuando la tasa de autodescarga es baja, la batería retiene su carga durante períodos prolongados, lo que la hace más eficiente y práctica para diversas aplicaciones, ya que su capacidad de almacenamiento se mantiene por más tiempo sin necesidad de recarga frecuente[26]

$$\text{Autodescarga(\%)} = \frac{\text{Capacidad Inicial} - \text{Capacidad final}}{\text{Capacidad Inicial}} * 100 \quad \text{Ecuación [4]}$$

## 1.9.8 Aspectos Fundamentales de la Energía

### 1.9.8.1 Densidad energética

Es la cantidad de energía eléctrica que puede almacenar por unidad de volumen. Se mide comúnmente en vatios-hora por kilogramo (W.h/kg) En esencia, esta medida indica la capacidad de almacenamiento de energía de una batería. Cuanto mayor sea la densidad de energía, más

energía puede almacenar por kilogramo de la batería. La densidad de energía junto a la energía específica determinan el tamaño de batería necesaria para alcanzar la autonomía eléctrica determinada [27].

#### **1.9.8.2 Densidad de potencia**

Es una medida que indica la máxima capacidad que una batería puede suministrar en relación con su peso o volumen. Se expresa en vatios por kilogramo (W/kg). Una mayor densidad de potencia implica que la batería puede proporcionar más energía por unidad de peso o volumen, siendo crucial en aplicaciones donde el espacio y el peso son limitados [28].

#### **1.9.8.3 Energía específica**

Es la cantidad de energía que un material o dispositivo puede almacenar por cada unidad de masa. Esta medida resulta fundamental al comparar distintos tipos de baterías, ya que permite identificar cuál puede proporcionar una mayor cantidad de energía. Una mayor energía específica implica que las baterías puedan almacenar más energía sin aumentar su peso, lo cual es especialmente beneficioso en los vehículos eléctricos al reducir su masa. Sus unidades se expresan en Julios por kilogramo (J/kg) o en vatios-hora por kilogramo (Wh/kg) [29].

#### **1.9.8.4 Potencia específica y Eficiencia energética**

La Potencia específica es la potencia que puede entregar una batería por unidad de peso (W/kg) (Obaldía et al., 2021). Y la Eficiencia energética se logra mediante la optimización del consumo de energía, utilizando diferentes mecanismos y prácticas destinadas a reducir el gasto de energía y mejorar su aprovechamiento [27].

### 1.9.9 Configuraciones en serie y paralelo de las baterías

La batería puede estar conformada por dos o más celdas que están conectadas en serie o paralelo, donde una celda es la unidad básica de una batería ya que es la encargada de transformar la energía química en energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas[30].

Al tener un voltaje y una capacidad limitada en cada celda podemos realizar conexiones de varias celdas para lograr obtener la demanda de energía del equipo. Al realizar la conexión en serie podemos sumar voltaje y en paralelo podemos sumar la capacidad de amperes-hora (Ah), incluso se puede realizar una combinación serie- paralelo ya que permite una aplicación con un voltaje mayor o si se requiere energía almacenada. Se debe considerar que las baterías que se desee unir sean del mismo tipo (voltaje, amperaje y modelo) [31].

#### 1.9.9.1 Conexión en serie

Para realizar este procedimiento se conecta el terminal positivo de una batería en el terminal negativo de la otra, con el fin de aumentar su voltaje, si se desea seguir incrementado se repite el mismo procediendo hasta lograr el voltaje requerido. Al final se conecta un cable tanto al terminal negativo como positivo para obtener el voltaje total, al momento de cargar las baterías en serie recuerda usar un cargador que coincida con el voltaje del sistema [32].



**Figura 1.3** Indicaciones de conexión en serie

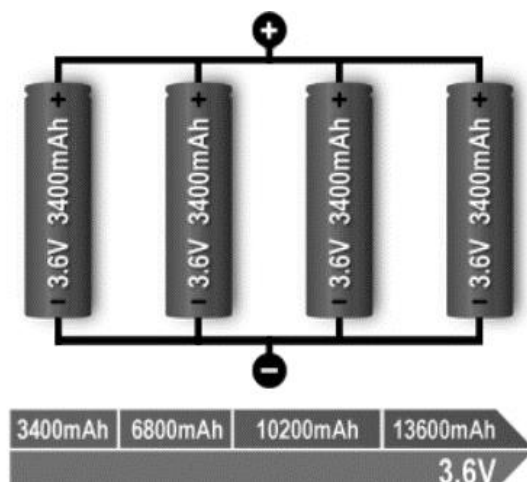
[31]

La **Figura 1.3** muestra las celdas conectadas en serie la capacidad será afectada por la que tenga menor valor, por eso es recomendable que sean todas iguales.



### 1.9.9.2 Conexión en paralelo

En la conexión en paralelo de dos baterías se aumenta la capacidad de Amperes- hora (Ah), sin alterar el voltaje de las baterías. Esta configuración ayuda a aumentar el tiempo que las baterías podrán respaldar un equipo, pero debido a su mayor capacidad Amperes- hora su tiempo de carga también es mayor[32].



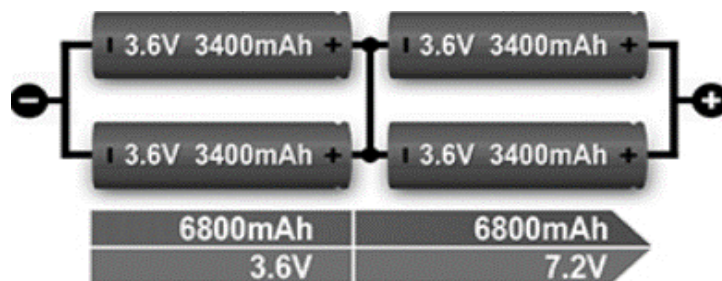
**Figura 1.4** Indicaciones de Conexión en Paralelo

[31]

La **Figura 1.4** muestra el procedimiento; se lo realiza conectando el terminal positivo de una batería al terminal positivo de la otra, del mismo modo se hace de los polos negativos. Un punto muy importante que sean las celdas idénticas sino existirá problemas debido al desbalance de cargas.

### 1.9.9.3 Conexión en serie y paralelo

Con esta conexión se logra alcanzar la capacidad y el voltaje deseado ya que es una conexión combinada, siempre considerando la polaridad de cada batería[31].



**Figura 1.5** Indicaciones de Conexión Serie/Paralelo

[31]

La **Figura 1.5** muestra la verificación estado de cada celda y de cada banco para que la carga sea uniforme y no tener problemas después de un tiempo.

### 1.9.10 Tipos de baterías de Litio

#### 1.9.10.1 Baterías de fosfato de hierro y litio (LiFePO<sub>4</sub>) o LFP

En este tipo de baterías, la combinación de iones de litio con fosfato de hierro ofrece varias ventajas significativas. Estas incluyen una seguridad óptima, una vida útil prolongada, una densidad energética moderada, voltajes más bajos, una tasa reducida de descarga espontánea y una capacidad excepcional para operar en condiciones de alta temperatura [33].

**Tabla 1.1** Reacción electroquímica de la batería de fosfato de hierro y litio

Electrodo	Reacciones químicas
Ánodo	$Li_n C_6 \rightleftharpoons Li_0 C_6 + nLi^+ + ne^-$
Cátodo	$Li_m - nFePO_4 + nLi^+ + ne^-$ $\rightleftharpoons Li_m FePO_4$
General	$Li_0 C_6 + Li_m - nFePO_4 \rightleftharpoons$ $Li_0 C_6 + Li_m FePO_4$

[34]

En la **Tabla 1.1**, se muestra que, al descargarse la batería, los átomos de litio del electrodo negativo se desprenden del grafito laminado, transformándose en iones de litio y electrones. Mientras los electrones fluyen fuera de la batería a través del circuito externo, los iones de litio atraviesan un

separador e ingresan en el fosfato de hierro en el electrodo positivo. Por el contrario, durante la recarga, el litio se separa del fosfato de hierro, dando lugar a la generación de iones de litio y electrones, estos electrones se trasladan al electrodo positivo e integran en la estructura del grafito.

**Tabla 1.2** Especificaciones de Batería (LiFePo4)

<b>LiFePo4</b>	
Voltaje nominal (V)	3.2 o 3.3
Voltaje máximo (V)	3.65
Voltaje mínimo (V)	2.5
Tasa de carga	1 C típico
Tasa de descarga	1 a 25 C pulso de 40 A
Energía específica (Wh/kg)	90 a 120
Densidad energética (Wh/kg)	100 a 120
Potencia específica (Wh/kg)	90 a 120
Ciclos de vida (W/kg)	1000 a 100000 ciclos
Rango de temperatura para carga máxima (°C)	0 a 45°
Rango de temperatura de descarga (°C)	-20 a 60°

Fuente: [35]

La **Tabla 1.2** presenta las especificaciones de la batería de fosfato de hierro y litio (LiFePo4). La batería tiene un voltaje nominal de 3.2 o 3.3 V, con un voltaje máximo de 3.65 V y un voltaje mínimo de 2.5 V. La tasa de carga típica es de 1 C, mientras que la tasa de descarga varía de 1 a 25 C, pudiendo alcanzar pulsos de 40 A. La energía específica de la batería está entre 90 y 120 Wh/kg, y su densidad energética es de 100 a 120 Wh/L. La potencia específica se sitúa entre 90 y 120 W/kg. Además, la batería tiene una vida útil que oscila entre 1000 y 10000 ciclos. El rango de temperatura para la carga máxima es de 0 a 45 °C, y el rango de temperatura para la descarga es de -20 a 60 °C, lo que la hace adecuada para una variedad de aplicaciones en diferentes condiciones ambientales.

### 1.9.10.2 Batería de Litio níquel manganeso óxido de cobalto o NMC.

La fabricación de cátodo está hecha de una combinación (LiNiMnCoO<sub>2</sub>) de níquel, manganeso, cobalto y el ánodo de grafito [36]. Una de las ventajas en este tipo de batería es que posee una alta potencia específica y una alta densidad energética. Por lo que es utilizada en herramientas eléctricas y trenes de potencia para vehículos. La reacción electroquímica de la batería de litio níquel manganeso óxido de cobalto se muestra en la siguiente:

**Tabla 1.3** Reacción electroquímica de la batería NMC

Electrodo	Reacciones Químicas
Ánodo	$Li_n C_6 \rightleftharpoons Li_0 C_6 + nLi^+ + ne^-$
Cátodo	$Li_m - n(Ni_x Mn_y Co_z) O_2 + nLi^+ + ne^- \rightleftharpoons Li_m (Ni_x Mn_y Co_z) O_2$
General	$Li_n C_6 + Li_m - n(Ni_x Mn_y Co_z) O_2 \rightleftharpoons Li_0 C_6 + Li_m (Ni_x Mn_y Co_z) O_2$

[34]

En la **Tabla 1.3** muestra la estructura de su cátodo laminado muestra un proceso de intercalación de una sola fase, a diferencia de las estructuras de olivino que presentan dos fases. En el NMC, el cátodo está compuesto por Li (Ni<sub>x</sub>Mn<sub>y</sub>Co<sub>z</sub>)O<sub>2</sub>. La suma de las fracciones molares (x, y, z) es igual a uno. Las especificaciones se muestran en la tabla

**Tabla 1.4** Especificaciones de Batería NMC.

Li (Ni <sub>x</sub> Mn <sub>y</sub> Co <sub>z</sub> )O <sub>2</sub>	
Voltaje nominal (V)	3.6 o 3.70
Voltaje máximo (V)	4.20
Voltaje mínimo (V)	2.50
Tasa de carga	0.7 -1 C
Tasa de descarga	1C o 2 C
Energía específica (Wh/kg)	200 - 260
Densidad energética (Wh/kg)	150 a 250
Potencia específica (W/kg)	300 a 800
Ciclos de vida	1000 a 2000 ciclos
Rango de temperatura para carga máxima	0 a 45 °C
Rango de temperatura de descarga	-20 a 60 °C

Fuente: [33] [37]

En la **Tabla 1.4** muestra la química de descarga del NMC es similar a la del LFP, dado que ambos son tipos de baterías de iones de litio. Este proceso sigue la oxidación del litio en el ánodo y la reducción en el cátodo.

### 1.9.10.3 Batería de Litio Níquel Cobalto Oxido de Aluminio o NCA

Son poco frecuentes en la industria de consumo, pero presentan numerosas ventajas para el sector automotriz debido a su alta densidad energética y durabilidad, aunque su seguridad es menor en comparación con otras baterías de litio. Además, es importante considerar que estas baterías suelen ser bastante costosas[36].

**Tabla 1.5** Reacción electroquímica de la batería NCA

<b>Electrodo</b>	<b>Reacciones Químicas</b>
Ánodo	$\text{Li}_n\text{C}_6 \rightleftharpoons \text{Li}_0\text{C}_6 + n\text{Li}^+ + n\text{e}^-$
Cátodo	$\text{Li}_m - n(\text{Ni}_x \text{Co}_y\text{Al}_z) \text{O}_2 + n\text{Li}^+ + n\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Li}_m (\text{Ni}_x \text{Co}_y\text{Al}_z) \text{O}_2$
General	$\text{Li}_n\text{C}_6 + \text{Li}_m - n(\text{Ni}_x \text{Co}_y\text{Al}_z) \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{Li}_0\text{C}_6 + \text{Li}_m(\text{Ni}_x \text{Co}_y\text{Al}_z) \text{O}_2$

[38]

En la **Tabla 1.5** muestra como presenta notables similitudes con la NMC al ofrecer una alta energía específica, una potencia específica razonablemente buena y una vida útil prolongada [37]. la reacción electroquímica que sucede al momento de su carga y descarga de la batería de litio níquel Cobalto Oxido de Aluminio se muestra.

**Tabla 1.6** Especificaciones de Batería (LiNiCoAlO<sub>2</sub>)

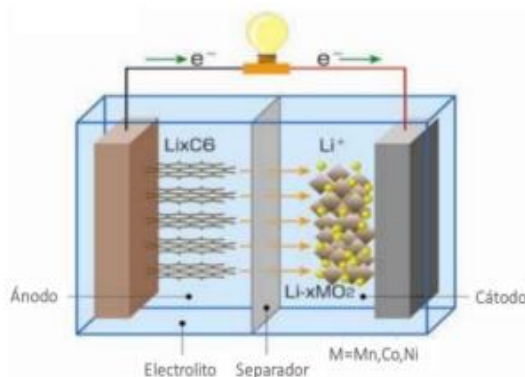
<b>LiNiCoAlO<sub>2</sub></b>	
Voltaje nominal (V)	3.6 o 3.8
Voltaje máximo (V)	4.2 o 4.3
Voltaje mínimo (V)	2.5 o 2.8
Tasa de carga	0.5 C-1 C
Tasa de descarga	1 C – 3 C
Energía específica (Wh/kg)	200 - 260
Densidad energética (Wh/kg)	150 a 220
Potencia específica (W/kg)	300 a 800
Ciclos de vida	500 a 1000 ciclos compts
Rango de temperatura para carga máxima (°C)	0 a 45
Rango de temperatura de descarga (°C)	-20 a 60

Fuente: [33] [37]

La mayoría de las baterías de litio comparten mucho la similitud de su estructura de capas en el cátodo la única diferencia es q remplaza el otro material por el aluminio. El Litio se oxida en el ánodo y se reduce en el cátodo, con la reacción de descarga que ocurre de derecha a izquierda y la reacción de carga en viceversa.

### 1.9.11 Composición Química de una Batería de Litio

Una celda de batería de iones de litio contiene cuatro componentes principales: cátodo, ánodo, electrolito y separador. A continuación, se muestra las funciones principales y las composiciones de materiales de los componentes principales [39].



**Figura 1.6** Composición de una batería de litio

**Tabla 1.7** Componentes, Funciones, Materiales de una Batería de Litio

<b>Componentes</b>	<b>Funciones</b>	<b>Materiales</b>
Cátodo	Durante la carga, se emiten iones de litio hacia el ánodo.	Polvo de óxido de metal de litio
Ánodo	Durante la descarga, se reciben iones de litio Recibir iones de litio del ánodo durante la carga. Emitir iones de litio durante la descarga.	(Li <sub>2</sub> O) Materiales a base de carbono.
Electrolito	Pasar iones de litio entre el cátodo y el ánodo.	Polvo de grafito Sales de litio y disolventes orgánicos.
Separador	Prevenir cortocircuitos entre el cátodo y el ánodo. Permitir el paso de iones de litio a través de poros en el separador.	Membranas micro porosas.

[39]

### 1.9.12 Sistema de seguridad en baterías

#### 1.9.12.1 Sistema de Gestión de Baterías (BMS)

Un Sistema de Gestión de Baterías (BMS) constituye una unidad de control diseñada para asegurar la operación segura del paquete de baterías en un sistema. La función primordial de un BMS es salvaguardar la integridad de la batería, abordando aspectos cruciales como la seguridad, el equilibrio de cada una de las celdas y los problemas asociados al envejecimiento. La supervisión individual de cada celda se torna indispensable por razones de seguridad, equilibrio y durabilidad. Adicionalmente, el BMS implementa medidas correctivas predefinidas en respuesta a cualquier condición anormal que pueda surgir en la infraestructura del sistema. Dada la influencia de la temperatura en el perfil de consumo de energía, el BMS también se encarga de verificar y asegurar un procedimiento adecuado para controlar la temperatura del sistema. De esta manera, se garantiza un funcionamiento óptimo, promoviendo tanto la seguridad como la eficiencia del sistema de baterías[40].

### 1.9.12.2 Tipos de BMS

Los BMS se encuentra en el mercado según su uso comercial y por su topología que es una característica muy importante porque afecta a su costo, a la facilidad de la instalación y manteniendo del mismo, sobre todo a la precisión de medidas y a su fiabilidad[41].

Existen dos tipos según su uso comercial:

*Estándar:* Estos BMS son muy comunes en el mercado debido a que ya se encuentran fabricados y su disponibilidad instantánea. Destaca en ser fácil en instalar y de usar además que son muy económicos. Se suelen usar para protecciones de pequeñas baterías de fabricantes chinos.

*A la Medida:* Son BMS creados a la medida y se tiene un control total del producto, son diseñados con circuitos integrados específicos (ASIC) los cuales son chips que se conectan directamente a las celdas los cuales permiten reducir el circuito y lo abaratan o también son diseñados usando electrónica analógica, se diseña completamente la circuitería de balanceo, control, potencia, monitorización, entre otros. Son más caros, pero permiten ser diseñados para cualquier voltaje, amperaje y número de celdas.

Por su topografía existen cuatro tipos de BMS:

*Centralizados:* Es un BMS montado en solitario, donde cada cable va conectado a cada una de las celdas. Su ventaja es que son muy compactos, no muy caros y son fáciles de reemplazar.

*Modular:* Es un BMS similar al centralizado pero dividido en varios que son iguales. Los cables de cada módulo van conectados a un grupo de celdas de la batería, uno de estos módulos será designado como maestro el cual controla toda la batería y la comunicación con todo el sistema y los demás módulos funcionan como simples dispositivos de medición.



*Maestro – Esclavo:* Es un BMS similar al modular con la misma instalación de varios módulos iguales (esclavos) los cuales realizan las medidas de varias celdas y el otro modulo diferente (maestro) realiza el tratamiento de información y las comunicaciones. La única diferencia con el BMS modular es que los esclavos son más baratos.

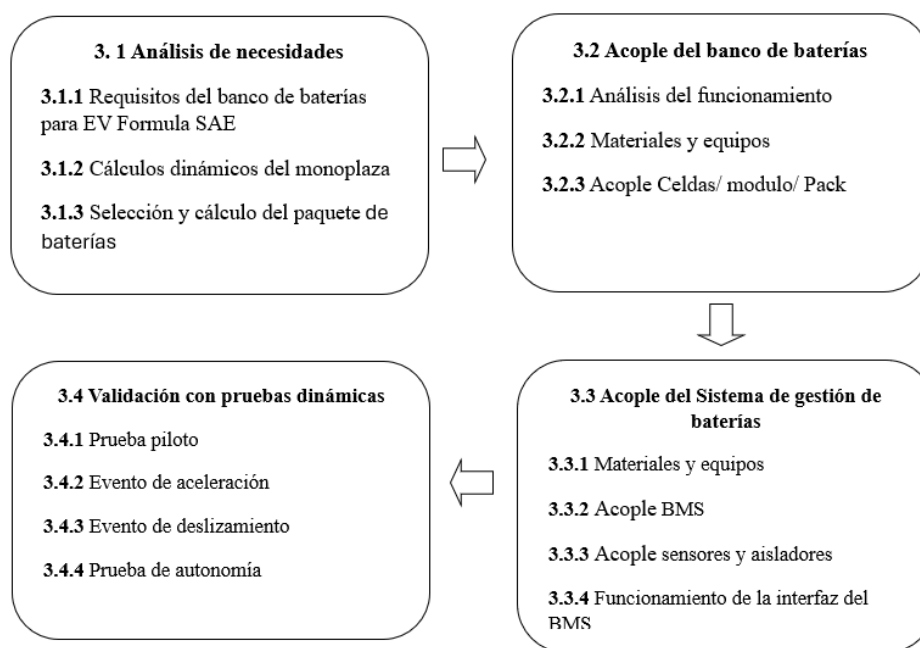
*Distribuido:* Es un BMS en el cual cada celda tiene un pequeño circuito de medida y todas se unen con un cable de comunicación hasta el controlador el cual realiza el tratamiento de información y las comunicaciones. Su desventaja es que son muy costosos.

## CAPÍTULO II

### 2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

#### 2.1 Metodología

El proceso de ensamblaje del sistema de carga de baterías nuevas de litio para un vehículo Formula SAE se realizó en cuatro etapas. (1) Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de las necesidades para definir los requisitos del banco de baterías y establecer criterios de calidad para el pack de baterías y el sistema de gestión de la batería (BMS). (2) Luego, se inició el ensamblaje del banco de baterías, seleccionando cuidadosamente materiales y equipos y realizando un análisis detallado de su funcionamiento. (3) Paralelamente, se acoplo el Sistema de Gestión de Baterías (BMS), integrando efectivamente sensores y aisladores. (4) Una vez completados los acoples, se procedió a la validación mediante pruebas dinámicas, que incluyeron eventos de aceleración, deslizamiento y una prueba de autonomía. Estas pruebas evaluaron el rendimiento del sistema de carga de baterías en condiciones de competición, asegurando su adecuación para el uso en el vehículo Formula SAE.

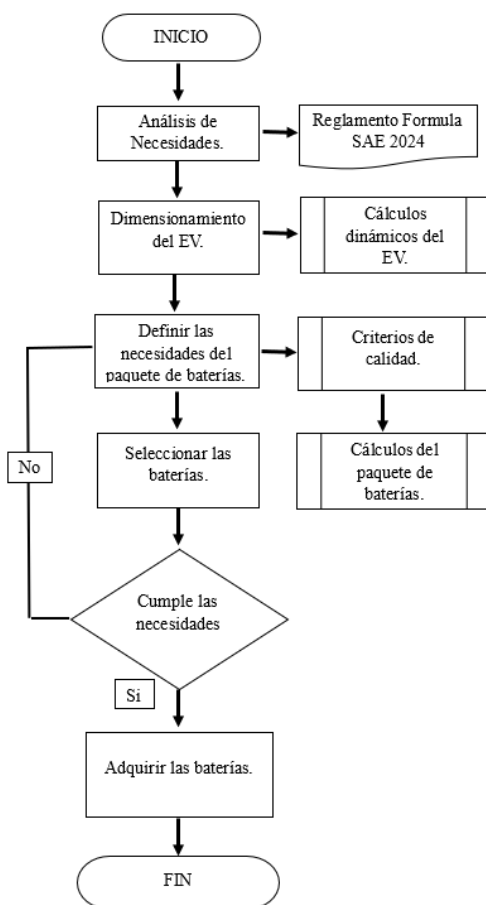


**Figura 2.1** Flujograma general de la metodología

La **Figura 2.1** muestra el proceso de acope del sistema de carga de baterías nuevas de litio para un vehículo de la Formula SAE implicó un análisis de necesidades, ensamblaje del banco de baterías y del sistema de gestión, y finalmente validación mediante pruebas dinámicas, garantizando así un rendimiento óptimo del vehículo.

### 2.1.1 Análisis de Necesidades

Para cumplir con los requisitos del banco de baterías para el EV Formula SAE, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de necesidades. Se realizaron cálculos dinámicos del monoplaza para determinar la demanda energética precisa. Además, se estableció un criterio de calidad para el paquete de baterías y el sistema de gestión de la batería (BMS), asegurando un rendimiento óptimo y una integración eficiente con el vehículo.



**Figura 2.2** Flujograma de la selección de las baterías

La **Figura 2.2** ilustra el procedimiento utilizado para elegir el conjunto de baterías que se acoplo en el prototipo eléctrico del monoplaza para la competición Formula SAE, incluyendo los subprocesos y documentos necesarios.

### 2.1.2 Requisitos del banco de baterías para EV Formula SAE

Para asegurar el óptimo desempeño del prototipo en la pista, se escogieron meticulosamente componentes que se ajustaban a las normativas. Esto implicó seleccionar un motor eléctrico, un controlador y un pack de baterías que cumplieran con los estándares establecidos, que se muestran resumidos en la **Tabla 3.1**.

**Tabla 2.1** Requisitos Formula SAE 2024

<b>Requerimientos del dimensionamiento</b>
Potencia máx.= 80 kW
Tensión máx.= 600 VCC
No hay límite en el número de motores.
Motor debe conectarse a un controlador, sin conexiones directas.
Acumulador debe ser fácilmente accesible para reemplazo.
Cada segmento del acumulador: <120 V CC.
Número de puntos de fijación según masa del contenedor (<20 kg: 4 puntos).
Implementar refrigeración si la batería supera los 60 °C.
Motor y controlador deben tener buena aceleración en 75 m.
Eficiencia en prueba de resistencia: 22 vueltas en pista de 1 km.

El motor eléctrico debería cumplir con las exigencias de potencia y torque del reglamento, integrándose de forma eficaz con el sistema de propulsión. Simultáneamente, el controlador que supervisa las sobre corrientes al motor, mientras que el paquete de baterías proporciona la energía necesaria sin exceder las limitaciones de peso y tamaño del reglamento.

### 2.1.3 Cálculo/ Dimensionamiento del tren de potencia

Conociendo las necesidades de autonomía de 22 km y una prueba de aceleración a 75 m según la normativa, comenzamos a trabajar con las dimensiones de vehículo.

**Tabla 2.2** Datos generales del EV

<b>Ficha Técnica Vehículo Vehículo (EV)</b>	
Ancho	1,36 m
Alto	1,25 m
Área frontal	1,7 m <sup>2</sup>
Velocidad promedio	48 km/h
Aceleración de 0 a 48 km/h	14 s
Peso del vehículo completo	253,31 kg
Medida del neumático	165/50 R13
Sistema de transmisión	Cadena y piñón
Tipo de batería	Plomo

La **Tabla 2.2** muestra los datos principales de nuestro vehículo para poder calcular las resistencias y potencias que tiene, al no estar en espacio vacío, se añadió datos como: gravedad, coeficiente de forma, coeficiente aerodinámico, densidad del aire y la fricción entre el neumático y el tipo de suelo, que también deben ser resistencias para vencer.

Se inicio calculando las resistencias en Newtons (N) que tiene el vehículo como se muestra en el **ANEXO I**, con las ecuaciones de la **Tabla 2.3**: (1) la resistencia a la rodadura; donde influye el peso, la gravedad y el coeficiente de fricción entre neumático y la pista. Con la ecuación (2) la resistencia aerodinámica; resistencia del aire donde interviene el tamaño y la forma del vehículo, así como la velocidad a la que se desplaza que en esta situación necesitamos una velocidad mínima igual al promedio que es de 48 km/h, (3) resistencia a la aceleración; influye en la potencia del motor. Calculamos las resistencias principales a vencer.

**Tabla 2.3** Ecuaciones de Resistencia (N)

1.	$F_{RR}=f_{RR} * m * g$
2.	$F_A=0,5 * \rho * C_X * A * V^2$
3.	$F_M=m * a$
4.	F total= $F_{RR}+F_A+F_M$ (N)

Después de conocer las resistencias que tiene el vehículo, se calculó la potencia (kW) que necesita el vehículo para poder iniciar el movimiento como se muestra en el **ANEXO II** y con las ecuaciones de la **Tabla 2.4**: (1) potencia a la rodadura; energía necesaria para vencer la resistencia al girar los neumáticos al desplazarse sobre una superficie, (2) potencia aerodinámica; energía necesaria para vencer la resistencia que el aire ejerce sobre el vehículo en movimiento (3) potencia a la aceleración; energía necesaria para aumentar la velocidad.

**Tabla 2.4** Ecuaciones de Potencias (kW)

1.	$P_R= F_{RR} * V$
2.	$P_A=F_A * V,$
3.	$P_M= F_M * V$
4.	$P_{necesaria}=\frac{P_{RR}+P_A+P_M+P_p}{\eta_{Transmission}}$ (Kw)

Finalmente se incluyó la eficiencia de la transmisión con un valor de 96% debido a las pérdidas de fricción y la ineficiencia de los componentes para poder encontrar la potencia necesaria que debe tener el vehículo en HP o kW.

#### 2.1.4 Selección/ Cálculo del paquete de baterías

Para evaluar adecuadamente la idoneidad de una tecnología de unión para interconexiones de baterías, es necesario deducir requisitos interdisciplinarios:

*Requisitos mecánicos*; La presencia del motor eléctrico mencionado en la **Tabla 2.5** requiere la generación de energía adecuada para alimentar el circuito, generando energía para poder recorrer una pista de 22 km a una velocidad promedio de 48 km por hora que se encontraron en los cálculos anteriores.

**Tabla 2.5** Motor instalados en el EV

<b>Características</b>	<b>Especificaciones</b>
Tipo	Brushless -Imanes permanentes - Trifásico
Voltaje (V)	60 V
Potencia (W)	2000 W
Velocidad nominal (RPM)	3000 – 3200 rpm
Par nominal (N.m)	85
Peso (kg)	5

El **ANEXO III** muestra el proceso del dimensionamiento del pack de baterías que sigue las ecuaciones de la **Tabla 2.4** Ecuaciones de Potencias (kW): (1) Para saber las necesidades que debe cumplir las baterías iniciamos calculando la autonomía en tiempo; (2) después de conocer el periodo de tiempo que necesitamos que funcione el motor, podemos calcular la energía total que el motor debe realizar; (3) A continuación, calculamos la capacidad que la batería debe tener para poder suministrar al motor antes de necesitar recarga; (4) Finalmente podemos calcular la cantidad de celdas en serie o paralelo para poder almacenar la energía que necesitamos.

**Tabla 2.6** Ecuaciones para el dimensionamiento del paquete de baterías

---

<b>1.</b>	$\text{Autonomía}(h) = \frac{\text{distancia del circuito}}{\text{velocidad promedio}}$
<b>2.</b>	$\text{Energía total (Wh)} = \frac{\text{potencia del motor}(W) * \text{autonomina deseada}(h)}{0,98}$
<b>3.</b>	$\text{Capacidad batería (Ah)} = \frac{\text{Energía total (Wh)}}{\text{voltaje de operación del motor}(V)}$
<b>4.</b>	$\#serie = \frac{\text{Voltaje de operación del motor}(V)}{\text{votaje de la celda}(V)} \quad \#paralelo = \frac{\text{Capacidad de la batería (Ah)}}{\text{Capacidad de la celda (Ah)}}$

---

*Requisitos eléctricos;* Para el pack de baterías se requiere un voltaje nominal entre 3,6 y 3,7 V y una corriente de carga constante máxima de 2,5 mA/h para un funcionamiento seguro y eficiente. Alta densidad energética y energía específica de las celdas de la batería. Esto implica que las celdas deben proporcionar la mayor cantidad de energía posible ocupando el menor volumen y peso. La tecnología de iones de litio, específicamente las celdas NMC (Níquel-Manganeso-Cobalto) y NCA (Níquel-Cobalto-Aluminio), son opciones preferidas debido a sus características favorables en este aspecto.

*Requisitos económicos;* debido a la cantidad de celdas que se ocupan en el pack de baterías, requiere un precio por unidad de 5-11 dólares es crucial para garantizar la viabilidad económica del proyecto.

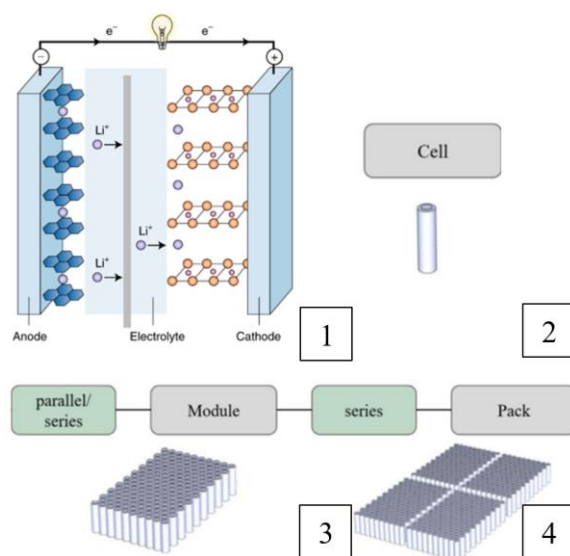
El análisis técnico y económico que se muestra en el **ANEXO IV** encontró 4 marcas con al menos una de las características que necesitamos y con otros parámetros importantes como: peso, voltaje, carga máx., voltaje nominal, voltaje de descarga, capacidad, corriente de carga constante máx., carga estándar constante, densidad energética, abreviatura química, resistencia interna, precio por unidad.



## 2.1.5 Acople del paquete de baterías

### 2.1.5.1 Análisis del funcionamiento

Los paquetes de baterías recargables, como los de iones de litio, almacenan energía mediante reacciones químicas reversibles; compuestos por cátodo, ánodo, electrolito y separador, se diseñan en estructuras de pack-módulo-celda para automóviles (Goodenough, 2019). Estos diseños combinan conexiones en serie y en paralelo para equilibrar capacidad y potencia, asegurando un rendimiento óptimo y sostenible en términos de autonomía y potencia del vehículo eléctrico [42].



**Figura 2.3** Análisis del funcionamiento de un banco de baterías

[42], [43]

La **Figura 2.3** muestra: (1) la recarga de una batería de Litio-ion, (2) una celda cilíndrica característica por ser barata y tener funciones de seguridad integradas, (3) una unidad individual compuesta por varias celdas de batería, (4) un pack de batería; una unidad ampliada que aloja múltiples módulos de batería, y a menudo incorpora sistemas de gestión de energía, refrigeración y una carcasa protectora.

## 2.2 Materiales y Equipos

Para el desarrollo del Pack de baterías, elegimos las celdas recargables de litio (Li-Ion) del tipo 18650. La batería de óxido de níquel, manganeso y cobalto (NMC). Esta selección se basa en sus notables ventajas en cuanto a energía específica, densidad energética y potencia específica que se muestran en la **Tabla 2.7**.

**Tabla 2.7** Especificaciones de la batería ROOFER

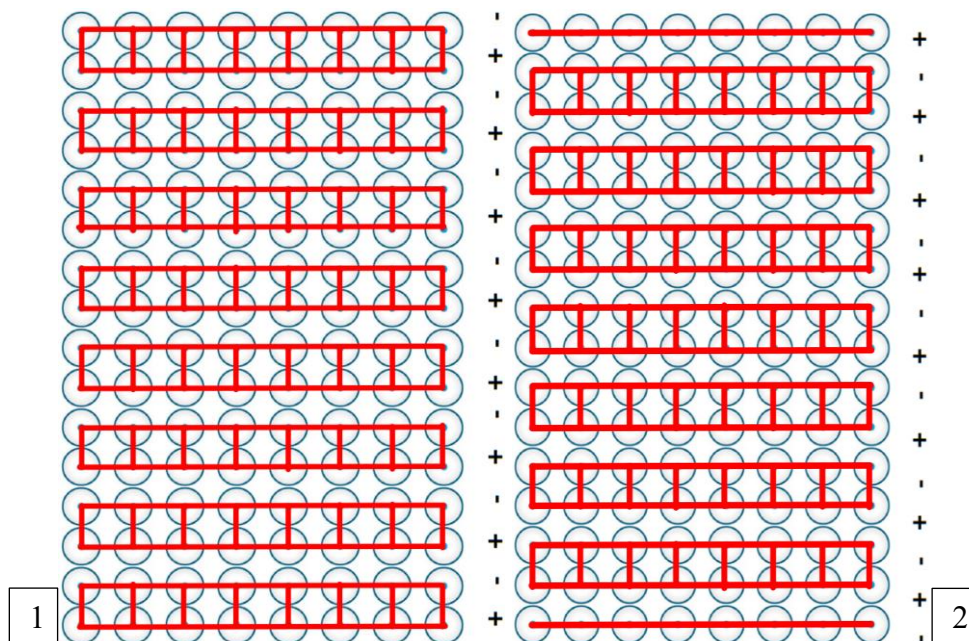
<b>Li-Ion – ROOFER- INR18650</b>		
Voltaje	3.7	V
Capacidad	2500	mAh
Diámetro	18	mm
Longitud neta	65	mm
Ciclos de carga	500 a 1000	ciclos
Carga máxima	4.2 a 4.3	V
Carga nominal	3.6 a 3.7	V
Carga mínima	2.65 a 2.75	V
Resistencia	$\leq 25$	m $\Omega$
Peso	45.6	g
Energía específica	9.25	Wh

La batería ROOFER destaca por su alta capacidad y energía específica, ofreciendo una cantidad significativa de energía en un tamaño compacto. Sus ciclos de carga duraderos, entre 500 y 1000, la hacen económicamente rentable a largo plazo. Además, su baja resistencia minimiza las pérdidas de energía, y sus estándares precisos de carga y voltaje aseguran un rendimiento óptimo y seguro en varias aplicaciones.

### 2.2.1 Acople Celdas/ modulo/ Pack

La **Figura 2.4** muestra; el acople de celdas, módulos y packs de baterías es un proceso crucial en la fabricación de sistemas de almacenamiento de energía. Implica la meticulosa integración de celdas individuales en módulos, luego en un pack, y se realizó siguiendo 4 pasos

(A-D). La **Figura 2.4 (1)** muestra la parte superior del paquete que se diferencia por la unión de las celdas. La **Figura 2.4 (2)** muestra la parte inferior del paquete que también consta de 16 celdas en serie y 8 en paralelo, unidas mediante la suelda por punto con níquel.



**Figura 2.4** Diagrama de soldadura con níquel en paralelo y serie.

A.- Verificación de celdas: Primero, se verifica el voltaje y el amperaje de cada celda para garantizar su óptimo funcionamiento y prevenir posibles defectos que podrían afectar el banco de baterías en el futuro. Se utiliza un multímetro para esta comprobación, asegurándose de que cada celda esté entre 3.6 y 3.7 voltios.

B.- Consideración de la polaridad: Se recuerda la importancia de la polaridad de cada celda, evitando posibles cortocircuitos. Se identifican los polos positivo y negativo de las celdas de litio y se verifica con un multímetro. Se opta por utilizar celdas nuevas para mayor seguridad.



**Figura 2.5** Construcción del Banco de Baterías

C.- La **Figura 2.5** muestra: Organización en estructura; se colocan las celdas en una estructura con espaciadores de plástico para proporcionar soporte y evitar el recalentamiento. Al organizar las celdas en columnas, se intercala la polaridad en filas alternas para facilitar la soldadura tanto en configuración serie como paralelo, garantizando una organización adecuada.



**Figura 2.6** Batería antes de soldar

D.- La **Figura 2.6** muestra: Fijación y Soldadura; después de organizar las celdas, se coloca otra estructura con espaciadores en el extremo opuesto del banco de baterías para brindar mayor firmeza. Luego, se lleva a cabo el proceso de soldadura utilizando tiras de níquel y una suelda de punto para asegurar una conexión sólida entre las celdas.

La soldadura por puntos con tiras de níquel es importante en la fabricación de baterías porque maneja mejor la corriente que el estaño y es resistente a la corrosión. Su alto punto de fusión evita que la unión se fracture por el calor generado durante el uso de la batería. Además, proporciona conexiones seguras y sólidas entre las celdas, asegurando una baja resistencia eléctrica. [44]

### 2.2.2 Acople del Sistema de gestión de baterías

Optamos por el BMS modelo SP17S005 debido a su voltaje de carga de 3.7 V y su compatibilidad con baterías tipo NMC. También fue determinante su capacidad para manejar 60 V y 20 amperios, así como su capacidad para configuraciones de 16 celdas en serie y 8 en paralelo. Además, el precio y la disponibilidad del producto fueron factores clave en nuestra elección. Para ensamblar el BMS al paquete de baterías utilizamos el método de cortocircuito del cable de 17 hilos [45]:

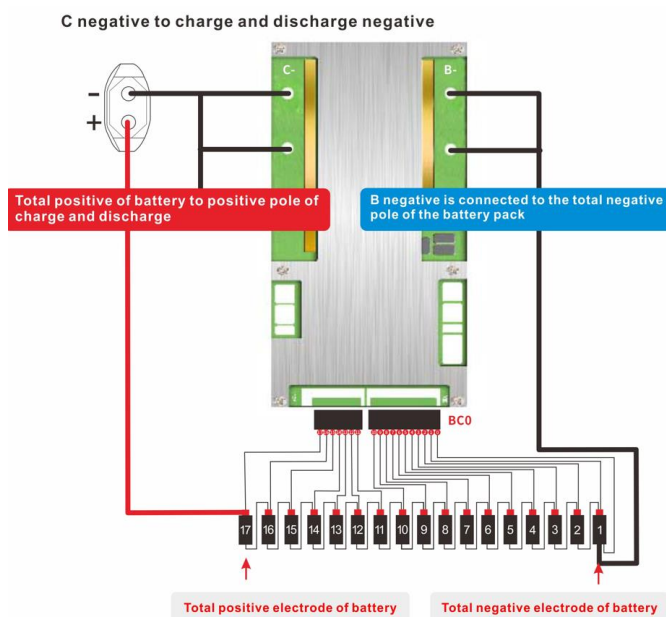


Figura 2.7 Diagrama de cableado

[45]

La **Figura 2.8** Acople del BMS muestra un diagrama del proceso que se debe seguir para instalar el BMS: 1. Preparación. El cable de equilibrio debe soldarse primero al pack de baterías y luego enchufarse al BMS después de verificarlo correctamente. No puedes conectar los cables de equilibrio al BMS y luego soldarlos al pack de baterías uno por uno.

2. Al realizar el cableado, conecte primero B negativo, luego conecte el cable y finalmente conecte C negativo al polo negativo del cargador y la carga. La batería siempre está conectada al cargador y a la batería.

3. Comience desde el primer cable del cable de equilibrio, conecte el primer cable al polo negativo de la primera cadena de celdas, comience desde el segundo cable, conecte los cables 2. ° a 17. ° al polo positivo de cada cadena de celdas y el cable 17 se conecta al electrodo positivo total de la batería (es decir, el polo positivo de la batería 17).

### 2.2.3 Materiales y equipos

Seleccionamos un Sistema de Gestión de Batería (BMS) luego de un análisis exhaustivo entre varias opciones. Este BMS garantiza un funcionamiento seguro y eficiente de la batería, prolongando su vida útil y maximizando su rendimiento.

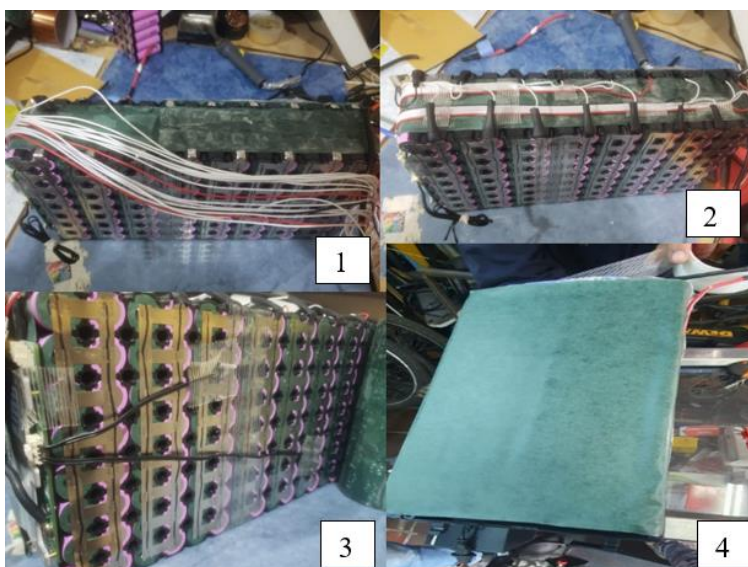
**Tabla 2.8** Características BMS

<b>Características</b>	<b>Especificaciones</b>
Marca	JIABAIDA
Modelo	17S Li ion Smart BMS
Voltaje de carga	60 voltios
Corriente de carga	60 amperios
Corriente de descarga	60 amperios
Temperatura de trabajo	-20 a 70 °C
Aplicaciones móviles	Electricidad Xiaoxiang

La **Tabla 2.8** muestra al BMS modelo “17S Li ion Smart BMS”, cuenta con conectividad Bluetooth para el monitoreo preciso de la tensión de cada celda, evitando sobrecargas y descargas excesivas.

### 2.2.4 Acople BMS

El procedimiento para instalar y preparar el Sistema de Gestión de Batería (BMS) en el pack de baterías se describen en 4 pasos en las imágenes siguientes:



**Figura 2.8** Acople del BMS

La **Figura 2.8** (1) muestra el paso 1; después de soldar y verificar la conexión de cada celda, se envuelve toda la batería con papel aislante. Esto se hace para prevenir posibles problemas y aumentar la seguridad, especialmente porque el sistema de gestión de baterías se instala al costado del banco de baterías.

La **Figura 2.8** (2) muestra el paso 2; se asegura que los cables del sistema de gestión de baterías no pasen por la parte superior del banco de baterías, ya que es metálica. Se guían por un costado de forma fija y ordenada. Además, se asegura que los cables del BMS se conecten en los

extremos de cada fila de celdas conectadas en paralelo, y se aplica tubo autofundente en los extremos para un mejor aislamiento.

### **2.2.5 Ensamble Sensores y aisladores**

El ensamblaje de sensores y aisladores en un Sistema de Gestión de Batería (BMS) es crucial para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente. Este proceso integra componentes que monitorean la temperatura y protegen contra cortocircuitos, contribuyendo a la fiabilidad del sistema.

La **Figura 3.9 (3)** muestra el paso 3; Se procede a la instalación de los sensores de temperatura del BMS. Estos sensores se colocan en los extremos y en el centro de la batería para obtener datos precisos sobre la temperatura. La conectividad del BMS con un teléfono celular permite visualizar en tiempo real el estado térmico de la batería.

La **Figura 3.9 (4)** muestra el paso 4; Después de ensamblar el pack de baterías, se cubre con papel de cebada para proteger contra la humedad y prevenir cortocircuitos, ya que actúa como aislante eléctrico. Luego, se cubre toda la batería con un tubo termorretráctil para proteger, aislar y reforzar las conexiones, cables y componentes, además de salvaguardarlos contra abrasiones y condiciones ambientales adversas.

### **2.2.6 Funcionamiento de la interfaz del BMS**

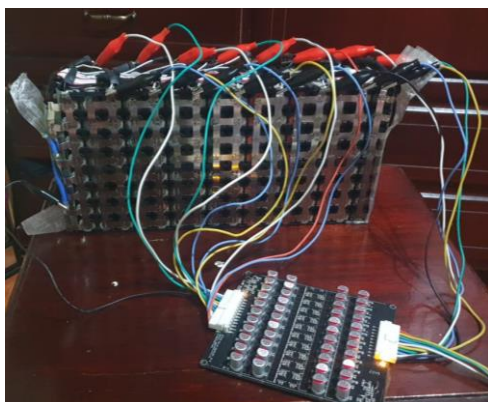
Un Sistema de Gestión de Baterías (BMS) conectado al celular mediante una interfaz UART a Bluetooth ofrece monitoreo remoto y control de baterías. Permite supervisar el estado de carga, temperatura y más, facilitando la gestión eficiente de energía.





**Figura 2.9** Aplicación móvil de BMS

La **Figura 2.9** muestra el paso 5; una vez completado el montaje, se descarga una aplicación para conectar el Sistema de Gestión de Batería (BMS) a través de Bluetooth en un teléfono celular. Esta aplicación permite visualizar el estado de carga, voltaje total, capacidad en amperios-hora y comportamiento de cada celda. También supervisa la temperatura de la batería para prevenir el sobrecalentamiento.



**Figura 2.10** Batería siendo balanceada

La **Figura 2.10** muestra el paso 6; Si se detecta que las celdas no están balanceadas, se conecta un balanceador de celdas para igualar el voltaje entre cada una. Este dispositivo monitorea constantemente el voltaje de cada celda y redistribuye la carga eléctrica en caso de disparidades.

Cuando las celdas de una batería no están balanceadas, la celda con el voltaje más bajo limita la capacidad total de la batería y tienen un desgaste prematuro.

El desbalance de celdas en una batería ocurre cuando el voltaje de una o más celdas es diferente al de las demás. Puede deberse a defectos de fabricación o a una carga y descarga desigual, lo que provoca variaciones en la capacidad o resistencia interna de las celdas. [46]

### **2.3 Validación con pruebas dinámicas**

La validación mediante pruebas dinámicas que se detallaron a continuación fue ejecutada en estricta conformidad con el reglamento actualizado de Formula SAE 2024. Este reglamento establecía los estándares y criterios exigentes que guiaron cada fase de nuestras evaluaciones.

#### **2.3.1 Prueba piloto**

Para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento del vehículo en los eventos dinámicos, realizamos una revisión técnica general que se muestra en la **Tabla 2.9** y **Tabla 2.10** incluyendo una prueba piloto para conocer las capacidades del EV en la **Figura 2.11** Prueba piloto y su maniobrabilidad.

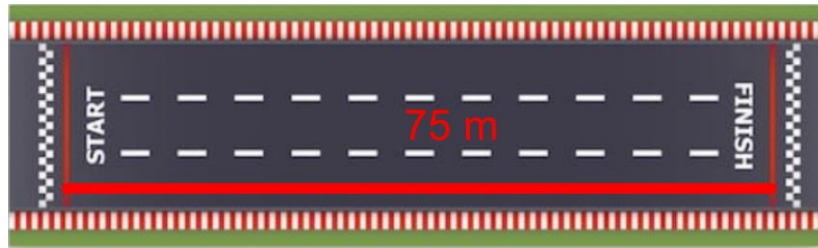
**Tabla 2.9** Revisión de Seguridad

<b>I.</b>	Puntos de conexión eléctricos	Verificar que estén bien aislados, protegidos y en buen estado.
<b>II.</b>	Controladores	Comprobar su funcionamiento correcto y la ausencia de daños.
<b>III.</b>	Motores eléctricos	Revisar que no presenten ruidos extraños, vibraciones o fugas.
<b>IV.</b>	BMS	Verificar su funcionamiento correcto y la ausencia de errores.
<b>V.</b>	Paquete de baterías	Inspeccionar su estado general, la ausencia de daños o corrosión, y la correcta conexión de los cables.
<b>VI.</b>	Sujeción del asiento	Verificar que estén bien fijados al piso y que no presenten holgura.

**Tabla 2.10** Revisión de Ruedas y neumáticos

<b>I.</b>	Ajuste correcto de las llantas	Verificar que las llantas estén bien centradas y que los pernos estén correctamente apretados.
<b>II.</b>	Estado de los neumáticos	Inspeccionar la presión, el desgaste y la ausencia de daños o deformaciones.
<b>III.</b>	Alineación de los neumáticos	Comprobar la divergencia y convergencia de las ruedas delanteras y traseras.

También se revisó la suspensión; suspensión frontal y posterior para verificar que esté en buen estado y que no presente fugas o daños. Sistemas de freno; el funcionamiento correcto de los frenos, la presión del líquido de frenos y la ausencia de fugas.



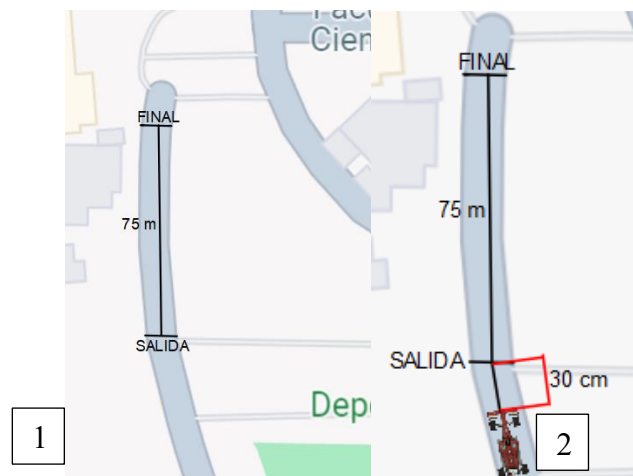
**Figura 2.11** Prueba piloto

La **Figura 2.11** muestra la pista que recorrió el vehículo igual a 75 metros, acoplado las baterías de litio después de aprobar la revisión técnica mecánica.

### 2.3.2 Evento de aceleración

Evaluamos la capacidad de acelerar del vehículo siguiendo las normas de la formula SAE:

- Pista de 75 m de longitud y 4,9 m de ancho
- El inicio y final de la pista marcado con líneas precisas
- El vehículo posicionado a 30 centímetros de la línea de salida
- El tiempo se registra desde que el vehículo atraviesa la línea de salida hasta que cruza la línea de llegada.
- Inclinación de la pista  $\pm$  1 grado



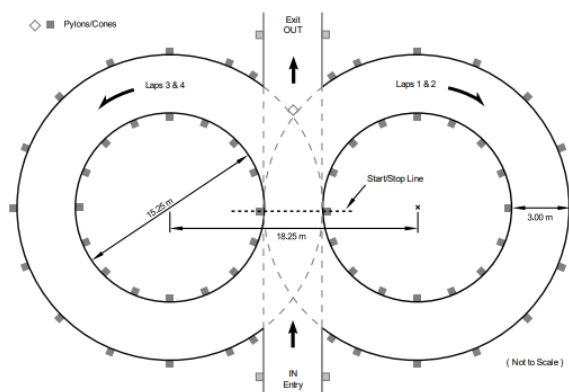
**Figura 2.12** (1) Zona del evento de Aceleración (2) Ubicación del EV

La **Figura 2.12** muestra (1) el dimensionamiento de la pista del evento de aceleración, la línea con conos que marca el final de la pista y (2) la posición correcta del EV para poder iniciar la prueba que es a 30 cm de la salida.

### 2.3.3 Evento de deslizamiento

El desafío evalúa la habilidad del vehículo en curvas mediante giros constantes en una pista con dos círculos concéntricos que forman una figura en forma de ocho definidos por (Formula SAE, 2023b, p. 131):

- Los círculos tienen diámetros de 15.25 metros y 21.25 metros, con 16 conos alrededor del círculo interior y 13 alrededor del exterior.
- El recorrido cuenta con puertas conectadas por un camino de 3 metros, donde el vehículo inicia y detiene el cronometraje después de completar dos vueltas en cada círculo.
- El vehículo realiza las primeras dos vueltas en el círculo derecho, seguidas de las siguientes dos en el izquierdo, y finalmente se retira en la misma dirección hacia la línea de partida.



**Figura 2.13** Pista Formula SAE

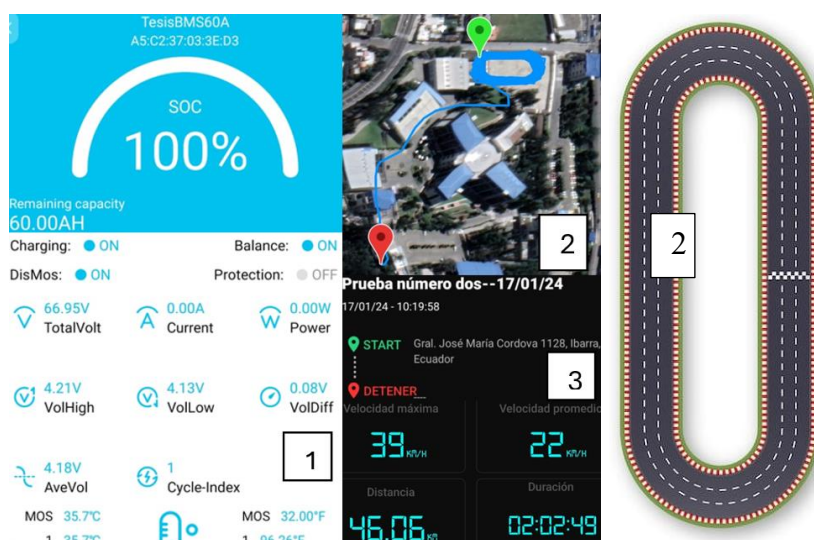
(Formula SAE, 2023b, p. 131)

La **Figura 2.13** muestra las dimensiones exactas, con diámetros y tamaño del carril que debe tener la pista de deslizamiento, se puede utilizar conos para limitar la pista en la zona de evaluación buscando una réplica del evento de deslizamiento.

El subviraje y el sobreviraje son dos fenómenos importantes que los equipos de Fórmula SAE deben considerar al diseñar y competir, ya que pueden afectar significativamente la maniobrabilidad del vehículo (sistemas de seguridad activa). Estos fenómenos son evaluados por los jueces durante las competencias. El subviraje se detecta observando si el vehículo tiende a irse recto en las curvas o si los neumáticos delanteros pierden agarre, mientras que el sobreviraje se identifica si el auto gira demasiado o si los neumáticos traseros pierden agarre. (Tandy et al., 2015).

### 2.3.4 Prueba de autonomía

Con el fin de evaluar la autonomía del paquete de baterías de litio, se realizaron pruebas continuas en un entorno controlado. Estas pruebas implican conducir el vehículo hasta que las baterías se descarguen por completo, registrando el voltaje inicial y el consumo de energía a intervalos regulares para analizar la autonomía en distancia, tiempo de carga y tiempo de descarga.



**Figura 2.14** (1) Al inicio (2) proceso (3) al final

La **Figura 2.14** muestra (1) El registro al iniciar la prueba de autonomía registrada en la aplicación, (2) la pista donde se mantuvo a una velocidad constante buscando la descarga del banco de baterías y (3) La llegada al taller para verificar la descarga de la batería según muestra la aplicación.

## CAPITULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Resultados

##### 3.1.1 Definición de necesidades

La necesidad principal del Vehículo Eléctrico (EV) es cumplir con los requisitos de la competencia Formula SAE donde se destaca: una Potencia máx.= 80 kW, Tensión máx.= 600 VCC, no hay límite en el número de motores, motor y controlador deben tener buena aceleración en 75 m, en prueba de resistencia: 22 vueltas en pista de 1 km, finalmente mantener una velocidad promedio entre 48 y 57 km/h [48, p. 134].

En la **Tabla 3.1.** se muestra el resultado de las tres resistencias obtenidas y la suma de estas que se oponen al movimiento y aumentan el consumo de energía del EV. También las Potencias necesarias para vencer las resistencias incluyendo la trasmisión de energía.

**Tabla 3.1** Resistencias y Potencias

<b>Resistencias</b>		<b>Potencias</b>	
Resistencia a la Rodadura	37,2631 N	Potencia a la Rodadura	0,59 kW
Resistencia Aerodinámica	57,28 N	Potencia Aerodinámica	0,89 kW
Resistencia a la Aceleración	286,48 N	Potencia a la Aceleración	4,53 kW
Suma de las Resistencias	380,02 N	Potencia Necesaria	6,26 kW

Los cálculos dinámicos encontrados indican una resistencia a vencer de 380,02 N para mantener una velocidad constante de 57 km/h, siendo necesario generar una Potencia de 6,26 kW o 8,40 HP para poder competir en la prueba de resistencia de 22 km.

La **Tabla 3.2.** muestra el dimensionamiento de las capacidades que debe satisfacer el paquete de batería, parte al saber que el recorrido más largo que se debe recorrer es de 22 km a una velocidad promedio mínima de 48 km/h.

**Tabla 3.2** Necesidades de la batería

	48 km/h	40 km/h	
<b>Autonomía</b>	27,5	33	minutos
<b>Energía total</b>	0,78	1,12	kWh
<b>Capacidad batería</b>	13,12	18,70	Ah
<b>Celdas en serie</b>	16,21	16,21	16 celdas
<b>Celdas en paralelo</b>	5,25	7,48	8 celdas

Los requisitos que debe cumplir el paquete de baterías por comprar inician por satisfacer al motor eléctrico con una potencia de 2000 W y un voltaje de operación de 60 V. Con la información presente encontramos que se necesita alimentar al EV por 33 minutos, generar energía  $\geq 1,1224$  kWh, la capacidad del pack igual a 18,70 Ah y un juego de celdas en serie igual a 16 y el paralelo de 8 en caso de tener una celda cilíndrica con 3,7 V y 2,5 mAh respectivamente.

### 3.1.2 Selección del Pack de baterías y BMS

El análisis técnico y económico muestra cuatro marcas que cumplen los requisitos químicos y mecánicos (ver ANEXO IV). Para el paquete de baterías, se seleccionaron celdas de litio 18650 de óxido de Níquel, Manganeso y Cobalto (NMC) por su energía específica, densidad energética y potencia (ver **Tabla 2.7** Especificaciones de la batería ROOFER), además de los requisitos económicos.






<b>Li-Ion – ROOFER- INR18650</b>	
Voltaje (v)	3,7
Capacidad (mAh)	2,5
Voltaje del Pack (V)	59,2
Capacidad del Pack (Ah)	20
Potencia total del Pack (kWh)	1,18

**Figura 3.1** Batería de litio seleccionada para acoplar en el EV

La **Figura 3.1** muestra el voltaje de 3,7 V y capacidad igual a 2,5 mAh de la celda cilíndrica y sus capacidades como paquete, destacando la potencia total que va a generar igual a 1,18 kWh satisfaciendo a los motores eléctricos para circular durante 22 km a 40 km/h.

El BMS seleccionado es el modelo SP17S005 por su voltaje de carga con 3,7 V y ser para baterías tipo NMC, incluyendo el precio y la ubicación del producto.



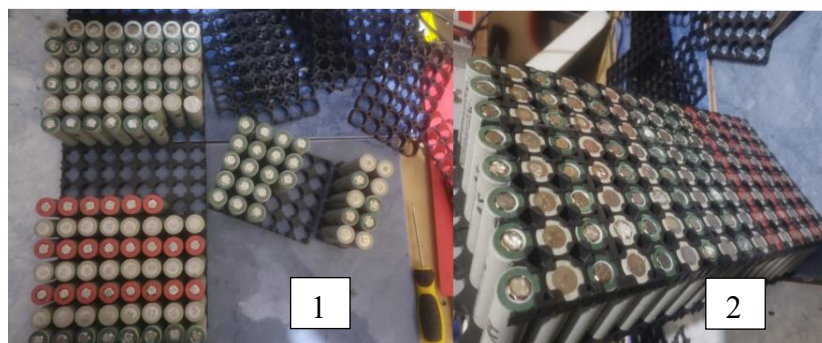
<b>JIABAI DA SP17S005</b>		
Voltaje de carga	Li-ion	3,7 V
Tempera de trabajo		-20 a 70 °C
Interfaz	Bluetooth	UART
Número de celdas		17 celdas
Para baterías tipo	Li-ion	NMC/NCA

**Figura 3.2** BMS seleccionado para el control del pack de baterías

La **Figura 3.2** muestra el BMS con sus características principales, destacando la interfaz para el monitoreo del estado de las baterías vía bluetooth y tiene la capacidad para conectar 16 celdas en serie que coinciden con nuestro paquete de baterías.

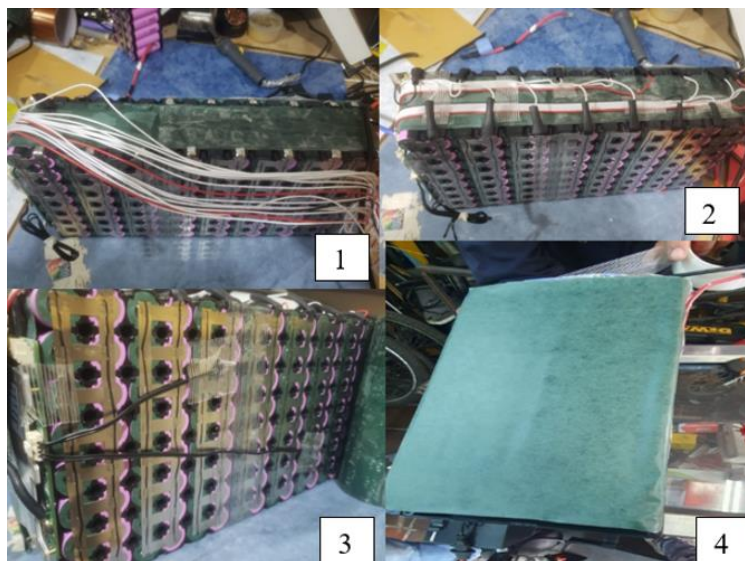
### 3.1.3 Acople del banco de pruebas

En la **Figura 3.3 (1)** se muestra la disposición de 8 celdas en paralelo, cada una con un voltaje unitario entre 3,6 y 3,7 voltios, colocadas en espaciadores de plástico. Por otro lado, la **Figura 3.3 (2)** ilustra la disposición adecuada de las baterías que forman el paquete, listas para soldar con tiras de níquel utilizando una suelda de punto.



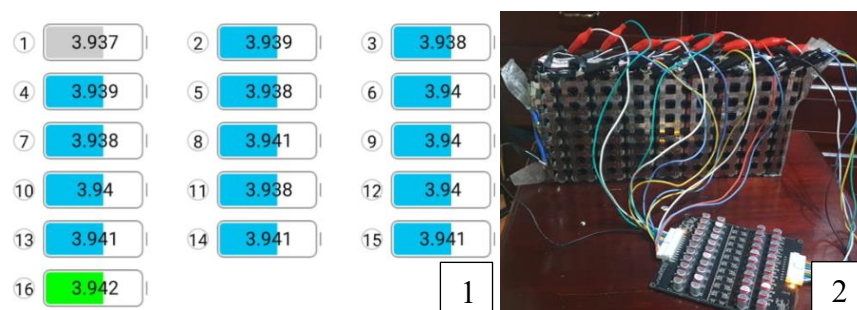
**Figura 3.3** Organización de celdas serie y paralelo

Los cables del BMS se aseguran, evitando la parte superior metálica del banco de baterías, guiándolos por un costado de manera ordenada y fija **Figura 3.4(1)**. Se recubrieron los cables con cinta auto fundente **Figura 3.4(2)**. Se instalaron sensores de temperatura en los extremos y en el centro de la batería, y se conectó el BMS a un teléfono celular para monitorizar en tiempo real el estado térmico **Figura 3.4(3)**. Finalmente, el paquete de baterías se protegió contra humedad y cortocircuitos, cubriéndolo completamente con papel de cebada y un tubo termorretráctil **Figura 3.4 (4)**.



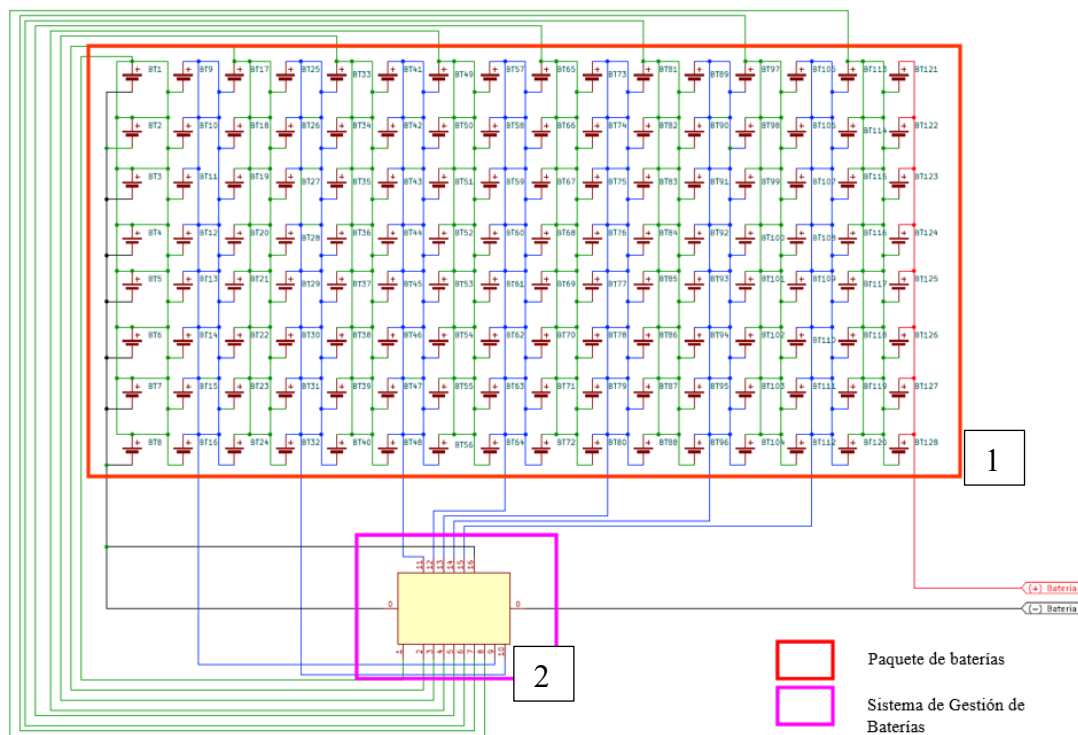
**Figura 3.4** Implementación de BMS

La interfaz detecta en la **Figura 3.5 (1)** que las celdas no están balanceadas limitando la capacidad del voltaje total y desgaste prematuro. La **Figura 3.5 (2)** muestra la conexión del paquete a un balanceador para igualar el voltaje de cada celda redistribuye la carga eléctrica.



**Figura 3.5** Desbalance de celdas.

Después del balanceo, el paquete de baterías tiene una capacidad de 20 Ah, con la capacidad para generar energía de 1,18 kWh. Se utilizaron 128 unidades de baterías cilíndricas, con un peso total de 6,12 kg. La configuración y el voltaje total y nominal se muestran en la **Figura 3.6**.



**Figura 3.6** Esquema eléctrico de conexiones.

En la **Figura 3.6** se observa la conexión del paquete de baterías con el BMS. La **Figura 3.6 (1)** muestra el acople de celda, módulo, paquete igual 8 celdas en paralelo y 16 celdas en serie, generando un paquete con un voltaje máximo de 66,95 V y un voltaje por módulo de 8 celdas cilíndrica igual a 4.15 V. La **Figura 4.6 (2)** muestra el BMS acoplado al paquete de baterías de litio, el conector de celdas con 16 pines conectados a los terminales del paquete de baterías.

### 3.1.4 Pruebas Formula SAE

El vehículo aprobó una revisión técnica mecánica; revisión de sistemas mecánicos y eléctricos, y una prueba piloto dinámica de 75 metros. Los eventos dinámicos que realizó para validar la mejora del monoplaza son el evento de aceleración, deslizamiento y autonomía. La **Tabla 3.3** muestra los resultados del evento de aceleración.

**Tabla 3.3** Datos Evento de Aceleración

<b>Nro. de Pruebas</b>	<b>Velocidad máx. (km/h)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Aceleración (m/s<sup>2</sup>)</b>
1	39	11.10	0,97
2	35	11.96	0,81
3	34	12.05	0,78
4	33	12.15	0,75
Promedio	35.25	11.81	0,82

El evento de aceleración se realizó en una pista de  $\pm 1^\circ$  en un suelo adoquinado tipo hormigón, en una pista de 75 metros y ubicando el vehículo a 30 centímetros de la salida. La **Tabla 3.3** muestra las 4 pruebas que se realizaron, con un promedio de velocidad máxima igual a 35.25 km/h en un tiempo de 11.81 segundos.

**Tabla 3.4** Datos Evento de deslizamiento

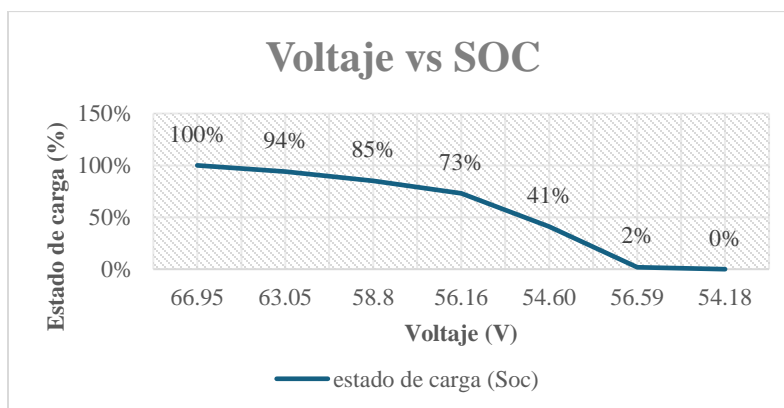
<b>Nro. de Pruebas</b>	<b>Velocidad máx. (km/h)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Aceleración (m/s<sup>2</sup>)</b>
1	31	17,95	0,47
2	40	14.67	0,75
3	35	16,59	0,58
4	38	15,14	0,69
Promedio	36	16,08	0,62

El evento de deslizamiento se realizó en una pista de  $\pm 1^\circ$ , en un suelo tipo hormigón, en una pista en forma de 8: con círculos de diámetros igual a 15.25 metros y 21.25 metros, con 16 conos alrededor del círculo interior y 13 alrededor del exterior y un ancho del carril de 3 metros, recorriendo 2 veces cada círculo. La **Tabla 3.4** muestra las 4 pruebas que se realizaron, con un promedio de velocidad máxima igual a 36 km/h en un tiempo de 16.08 segundos.

**Tabla 3.5** Datos Autonomía

<b>Estado inicial batería</b>	100 %
<b>Tiempo de carga</b>	4 h
<b>Voltaje</b>	66,95 V
<b>Distancia recorrida</b>	48,06 km
<b>Tiempo de descarga</b>	3:02 h
<b>Velocidad Máxima</b>	32 km/h
<b>Velocidad Promedio</b>	22 km/h

En el evento de autonomía se realizó en una pista de  $\pm 1^\circ$ , en un suelo tipo hormigón, en una pista con forma ovalada en un circuito cerrado, recorriendo el circuito las veces que sea necesario hasta que las baterías se descarguen por completo y el vehículo se detenga. La **Tabla 3.5** muestra los resultados obtenidos después de realizar el recorrido a una velocidad máxima de 32 km/h y un tiempo de descarga de 2 horas y 2 minutos.

**Figura 3.7** Relación entre voltaje y SOC

La **Figura 3.7** ilustra la relación entre el voltaje (V) y el estado de carga (SOC) de la batería durante su funcionamiento. En esta gráfica, el voltaje se representa en el eje X y el SOC en el eje Y, mostrando una disminución del voltaje a medida que se reduce el estado de carga. Al inicio del evento de autonomía, la batería estaba completamente cargada con un SOC del 100% y un voltaje de 66.95 V. Durante el evento, se registraron múltiples datos que evidencian cómo el voltaje disminuye progresivamente hasta que el SOC alcanza el 0%, momento en el cual el voltaje

desciende a 54.18 V. Esta relación es fundamental para el monitoreo y la gestión de baterías, ya que permite estimar el estado de carga basándose en las mediciones de voltaje.

## 3.2 Discusión

### 3.2.1 Consideraciones del dimensionamiento

Para el análisis de los resultados, tenemos dos variables importantes que comparar:

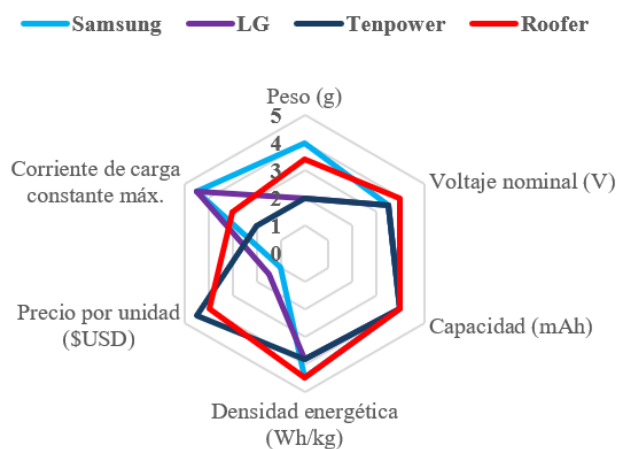
La primera, como se muestra en la **Tabla 3.1** Resistencias y Potencias, se relaciona con la competencia de aceleración y deslizamiento. En esta competencia, el objetivo es que el vehículo alcance una velocidad promedio máxima de 57 km/h durante un recorrido de 22 km (Formula SAE, 2023b, p. 134). Se determinó que el vehículo requiere una potencia de 5.97 kW (8 HP) para cumplir con estos requisitos. Sin embargo, al considerar la eficiencia de transmisión de los piñones y las pendientes de la pista, se calcula que se necesita una potencia de 23.71 kW (31,79 HP).

En la segunda variable, realizamos un dimensionamiento para cumplir con los requisitos de la competencia de autonomía para nuestro vehículo actual, que tiene una potencia de 3.73 kW (5 HP) (Tabla 3.3, Motor instalado en el EV). En esta competencia, se busca que el vehículo mantenga una velocidad promedio mínima de 40 km/h durante los 22 km del recorrido. Después de considerar que la velocidad promedio debe oscilar entre 48 y 57 km/h, calculamos que se necesita una autonomía de 33 minutos y una energía total generada por las baterías para los motores eléctricos del tren de potencia, igual a 1,18 kWh. Para cumplir con estos requisitos, se propone una configuración de celdas de 16 en serie y 8 en paralelo, como se muestra en la Tabla 4.2.

Las necesidades del EV para competir en la Formula SAE no pueden satisfacerse únicamente mejorando el paquete de baterías, ya que se requiere uno o más motores que generen una potencia de 23.71 kW (31,79 HP).

### 3.2.2 Selección de la batería

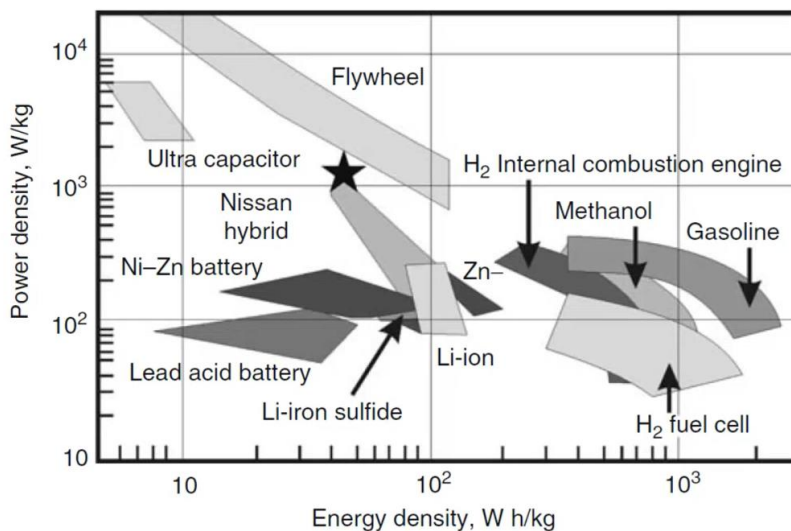
Al conocer las necesidades principales como Energía total, voltaje V y capacidad en Ah que debe cumplir el paquete, la selección de la batería se centró en otras variables objetivas ANEXO IV: Peso (g), Voltaje nominal (V), Capacidad (mAh), Densidad energética (Wh/kg), Precio por unidad (\$USD), Corriente de carga constante máx. Buscando una batería que cumpla iniciando por la geometría cilíndrica por su alta densidad de energía, mejor disipación de calor y principalmente por la rentabilidad que es importante para el proyecto [49].



**Figura 3.8** Parámetros principales a cumplir antes de seleccionar.

Como se puede observar en la **Figura 3.8** la celda cilíndrica Roofer de color rojo se mantiene estable en los apartados con un puntaje mínimo en su corriente de carga máxima con 3 puntos por ser de 2,5 A, y su mayor ventaja en la densidad energética con 4.5 puntos por ser de 200 Wh/kg. Finalmente, por tener un valor de 6 \$USD es seleccionada sobre las otras tres celdas.

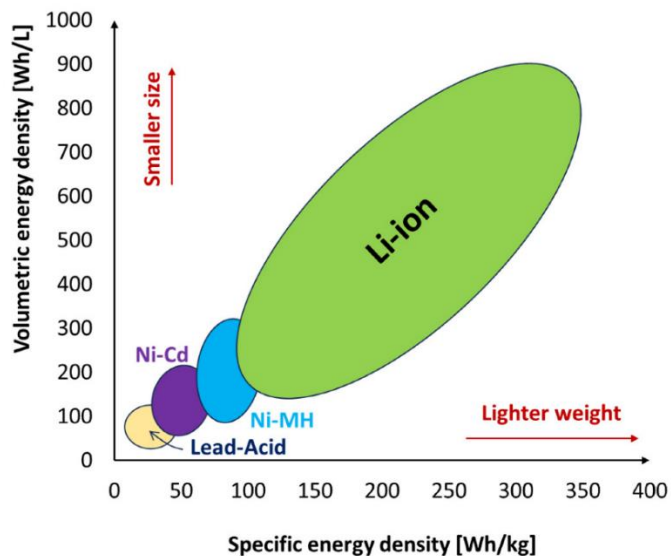




**Figura 3.9** Sistemas de almacenamiento de energía de baterías

[50]

El vehículo era propulsado por baterías plomo-acido ahora tiene un sistema de almacenamiento de energía de baterías de litio. La **Figura 3.9** muestra las baterías de iones de litio (Li-Ion) ofrecen una densidad de potencia significativamente mayor (en W/kg) en comparación con las baterías de plomo-ácido (Pb-Ácido) [50]. Esto significa que pueden proporcionar más potencia por kilogramo de peso, siendo ideales para aplicaciones que requieren ráfagas de alta potencia. Además, las baterías Li-Ion tienen una densidad de energía superior (en Wh/kg), lo que les permite almacenar más energía por kilogramo de peso en comparación con las baterías Pb-Ácido.



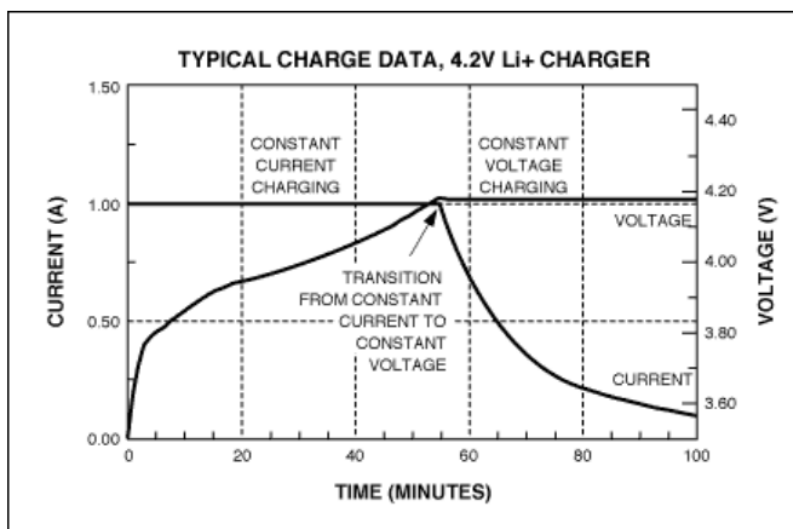
**Figura 3.10** Densidad de energía específica y densidad de energía volumétrica

Las baterías de iones de litio son uno de los tipos de baterías recargables más populares en el mercado para aplicaciones automotrices debido a sus numerosas ventajas. Poseen una de las energías específicas más altas (150-350 Wh/kg) y densidades de energía (100-800 Wh/L) entre las tecnologías de baterías disponibles, como se muestra en la **Figura 3.10**. Además, tienen un alto voltaje de circuito abierto, entregando hasta 3,7 V, lo cual es tres veces mayor que tecnologías como NiCd y NiMH. También presentan una baja tasa de autodescarga de aproximadamente 1,5 a 2 % por mes y no sufren el efecto memoria, una ventaja sobre las baterías de NiCd y NiMH que sí muestran este efecto. Además, exhiben una pérdida lenta de carga cuando no están en uso. Por último, no contienen cadmio tóxico, lo que facilita su eliminación en comparación con las baterías de NiCd [51].

### 3.2.2.1 La importancia del control de carga

Las baterías de plomo-ácido son menos sensibles a las variaciones de voltaje que las de iones de litio, permitiendo sistemas de gestión de carga menos precisos. Esto puede resultar en cargas incompletas o excesivas, reduciendo su capacidad y vida útil. Aunque no requieren un

balanceo de celdas tan riguroso, el desequilibrio de celdas puede ocurrir, afectando su desempeño y durabilidad. Un control de carga deficiente puede empeorar estos problemas [52].



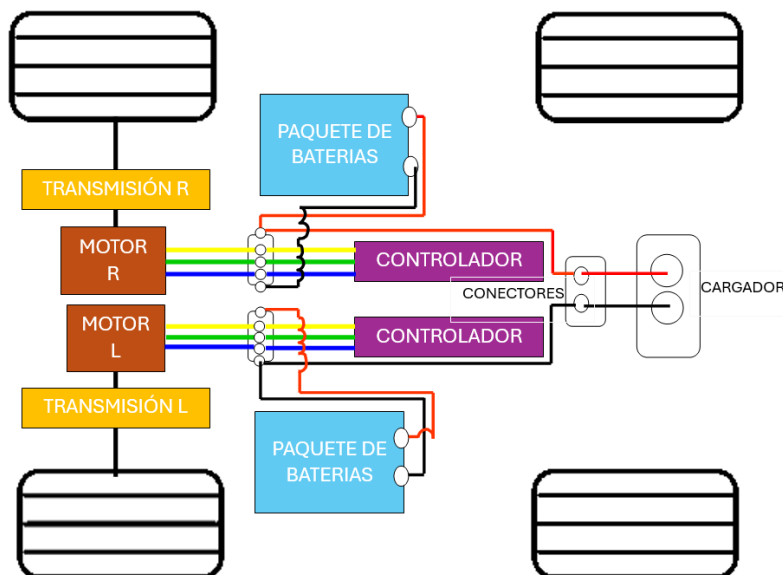
**Figura 3.11** Corriente Constante y Voltaje Constante (CCCV)

Fuente: [53].

La **Figura 3.11** muestra la Corriente Constante, Voltaje Constante (CCCV) es una técnica común para cargar baterías de iones de litio. Comienza con una corriente constante hasta alcanzar un voltaje cercano al máximo, momento en el que cambia a un régimen de voltaje constante. La corriente disminuye gradualmente hasta un valor muy bajo, manteniendo el voltaje constante. El corte de carga debe ser especificado por el fabricante para asegurar una carga completa, alcanzando un estado de carga del 100% [54].

### 3.2.2.2 Diagrama Sistema actual

Después de realizar el dimensionamiento total del vehículo, una de las principales necesidades a considerar fue la elección de las celdas de litio cilíndricas y las ventajas que aporta al vehículo de Formula SAE.



**Figura 3.12** Nuevo diseño del vehículo

Como se puede observar en la **Figura 3.12** para el vehículo diseñado, es esencial almacenar la mayor cantidad de energía posible por unidad de volumen y peso, ya que el espacio y el peso son limitados. Las celdas de litio cilíndricas cumplen con estos requisitos debido a su alta densidad energética y su prolongada vida útil, soportando entre 2000 y 5000 ciclos de carga y descarga, en comparación con las baterías de ácido-plomo que solo soportan entre 500 y 1000 ciclos.

Además, las celdas de litio sufren menos degradación, manteniendo su capacidad de carga efectiva por más años. Su eficiencia de carga y descarga es notablemente alta, entre el 90% y el 95%, mientras que la eficiencia de las baterías de ácido-plomo es solo del 70% al 80%. Esto significa que se pierde menos energía durante los procesos de carga y descarga.

Otro beneficio de las celdas de litio es que requieren poco mantenimiento. Aunque su costo inicial es mayor, su vida útil más larga y menor necesidad de mantenimiento resultan en un costo total de propiedad más bajo a largo plazo. Funcionan eficientemente en un rango más amplio de temperaturas y permiten descargas profundas de hasta el 80% de su capacidad sin sufrir daños

significativos, en comparación con las baterías de ácido-plomo, que solo pueden descargar hasta el 50% de su capacidad sin daños.

En términos de seguridad, las celdas de litio están equipadas con sistemas de gestión de baterías (BMS) que protegen contra sobrecarga, descargas profundas y sobrecalentamiento. Además, no sufren de sulfatación, un problema común en las baterías de ácido-plomo.

Finalmente, desde una perspectiva medioambiental, las celdas de litio son menos contaminantes que las de ácido-plomo, lo que las convierte en una opción más ecológica.

### 3.2.3 Comparativa de pruebas de la Formula SAE

En el siguiente apartado se presentan los datos obtenidos utilizando la báscula E-Z WEIGH Scale, un instrumento de gran precisión y utilidad para comparar diferentes pesos. Se evaluaron tres condiciones: en vacío (sin ningún tipo de baterías), con baterías de plomo-ácido y con baterías de litio.

**Tabla 3.6** Distribución de peso del EV

Peso Sin Baterías (kg)		Peso Baterías de Plomo (kg)		Peso Baterías de Litio (kg)	
LFW	RFW	LFW	RFW	LFW	RFW
51.25	51.25	56.24	60.32	51.25	54.88
LRW	<b>210</b>	RRW	<b>252.19</b>	LRW	<b>223.62</b>
54.43	54.43	70.30	65.31	61.23	56.24

En la **Tabla 3.6** se presentan los datos detallados de la distribución de peso en el vehículo bajo diferentes condiciones. Inicialmente, el peso del vehículo sin baterías es de 210 kg (463 lb).

Al instalar las baterías de plomo-ácido, el peso total del vehículo aumenta a 252.19 kg (556 lb). Esto representa un incremento de 42.18 kg (93 lb), equivalente a un 20.1% más en comparación con el peso sin baterías.

Con la implementación de las baterías de litio, el peso total del vehículo es de 223.62 kg (493 lb). Esto supone una reducción de 28.57 kg (63 lb) que equivale a 11.3% en comparación con las baterías de plomo-ácido. Además, al comparar el peso con las baterías de litio respecto al peso sin baterías, se observa un incremento de 13.60 kg (30 lb), lo que corresponde a un aumento del 6.5%.

Estos datos destacan la ventaja de las baterías de litio en términos de reducción de peso en comparación con las baterías de plomo-ácido, lo que puede traducirse en beneficios como una mayor eficiencia energética y mejor rendimiento del vehículo.

**Tabla 3.7** Comparación de resultados de evento de aceleración y deslizamiento

	Evento de aceleración		Evento de deslizamiento		
	Pb	Li-ion	Pb	Li-ion	
Tiempo	12,17	11,81	17,68	16,08	s
Velocidad	33,25	35,25	33	36	km/h
Aceleración	0,75	0,82			m/s <sup>2</sup>

La **Tabla 3.7** compara los resultados de dos eventos diferentes: el evento de aceleración y el evento de deslizamiento, evaluados en dos condiciones de batería distintas: plomo (Pb) y ion de litio (Li-ion).

En el evento de aceleración, se registraron los tiempos transcurridos desde el inicio hasta alcanzar una velocidad máxima, así como las velocidades y aceleraciones alcanzadas durante este proceso. Los tiempos registrados para las baterías de plomo y de ion de litio fueron 12.17 y 11.81 segundos, respectivamente. En términos de velocidad máxima alcanzada, se registraron valores de 33.25 km/h para las baterías de plomo y 35.25 km/h para las de ion de litio. La aceleración media durante el evento de aceleración fue de 0.75 m/s<sup>2</sup> para las baterías de plomo y de 0.82 m/s<sup>2</sup> para las de ion de litio.

Por otro lado, en el evento de deslizamiento, se registraron los tiempos transcurridos desde el inicio hasta detenerse completamente, así como las velocidades alcanzadas durante este proceso. Los tiempos registrados para las baterías de plomo y de ion de litio fueron 17.68 y 16.08 segundos, respectivamente. En términos de velocidad máxima alcanzada durante el deslizamiento, se registraron valores de 33 km/h para las baterías de plomo y 36 km/h para las de ion de litio.

Si los datos los llevamos a porcentajes se obtendría en el evento de aceleración, las baterías de ion de litio demostraron un rendimiento superior en términos de tiempo, velocidad y aceleración. En comparación con las baterías de plomo, las baterías de ion de litio redujeron el tiempo de aceleración en un 2.9%, alcanzaron una velocidad máxima un 6% mayor y proporcionaron una aceleración un 9.3% superior.

En el evento de deslizamiento, nuevamente se observó un mejor desempeño con las baterías de ion de litio. El tiempo de deslizamiento se redujo en un 9.05%, mientras que la velocidad máxima aumentó en un 9.1% en comparación con las baterías de plomo.

Los resultados muestran que, en ambos eventos, las baterías de ion de litio tienden a ofrecer tiempos menores y velocidades mayores en comparación con las baterías de plomo, lo que sugiere un mejor rendimiento en términos de aceleración y deslizamiento. Además, se observa que la aceleración promedio durante el evento de aceleración es ligeramente mayor para las baterías de ion de litio en comparación con las de plomo.

**Tabla 3.8** Comparación de la autonomía de los dos packs de batería

<b>Datos de autonomía</b>	<b>Pb</b>	<b>Li-ion</b>	
Estado inicial batería	100	100	%
Tiempo de carga	8	4	h
Voltaje	64,7	66,95	V
Distancia recorrida	22,27	48,06	km
Tiempo de descarga	1:25	3:02	h
Velocidad Máxima	32	32	km/h
Velocidad Promedio	22	22	km/h

En la **Tabla 3.8** se comparan los resultados de dos eventos diferentes: la autonomía con baterías de plomo-ácido y con baterías de litio. Las baterías de iones de litio (Li-ion) superan significativamente a las de plomo (Pb) en varios aspectos críticos: se cargan en la mitad del tiempo (4 horas frente a 8 horas), ofrecen un voltaje ligeramente superior (66.95 V frente a 64.7 V), permiten recorrer más del doble de la distancia (48.06 km frente a 22.27 km), y tienen un mayor tiempo de descarga (3:02 h frente a 1:25 h). Ambas baterías mantienen la misma velocidad máxima y promedio (32 km/h y 22 km/h, respectivamente). Estas ventajas hacen que las baterías Li-ion sean una opción mucho más eficiente y práctica para aplicaciones que requieren alta autonomía y rápida recarga.



## CAPITULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

- En conclusión, el dimensionamiento del tren de potencia del vehículo eléctrico (VE) revela que es necesario superar una resistencia de 343.26 N para mantener una velocidad de 48 km/h, requiriendo una potencia de 4.76 kW (6.4 HP). Esta capacidad es crucial para competir eficazmente en las pruebas planificadas. Los resultados destacan la importancia de un diseño preciso del tren de potencia para cumplir con los estándares de las competiciones automovilísticas. La correcta selección y dimensionamiento de los componentes, desde el motor hasta las baterías, son esenciales para optimizar el rendimiento, la eficiencia energética y la durabilidad del vehículo. El cálculo del paquete de baterías es vital para garantizar la compatibilidad con el Sistema de Gestión de Baterías (BMS) y las necesidades del motor.
- La celda cilíndrica Roofer es la opción ideal para el paquete de baterías con el BMS. Su voltaje de 3.7 V proporciona estabilidad y eficiencia óptimas. Soporta una corriente de carga máxima de 2.5 A, crucial para tiempos de carga razonables y rendimiento sostenido. Su alta densidad energética de 200 Wh/kg es vital para vehículos eléctricos, mejorando autonomía y eficiencia, y reduciendo el peso total del paquete, lo que mejora la aceleración y manejo el vehículo. Con un costo de 6 USD por celda, combina rendimiento y costos, posicionándose como la elección óptima para un rendimiento superior y competitividad económica.
- Al realizar los cálculos, se determinó que el voltaje de operación del motor es de 60 V y la capacidad de la batería es de 20 Ah. Para cumplir estos requisitos, se implementó una

configuración de 16 celdas en serie y 8 en paralelo. Cada celda tiene un voltaje de 3.7 V, resultando en un total de 59.2 V, proporcionando un margen adecuado para la estabilidad del motor. La capacidad de 20 Ah se logró conectando 8 grupos en paralelo, cada uno con 2.5 Ah. Esta configuración equilibra el voltaje y la capacidad, optimizando la eficiencia, autonomía y fiabilidad del sistema.

- Al comparar el vehículo equipadas con baterías de plomo y baterías de litio, se observó una reducción de peso de 63 lb, lo que representa una disminución del 11.3%. En cuanto a las pruebas de aceleración, las baterías de litio demostraron un rendimiento superior en términos de tiempo, velocidad y aceleración. Las baterías de litio redujeron el tiempo de aceleración en un 2.9%, aumentaron la velocidad máxima en un 6% y mejoraron la aceleración en un 9.3% en comparación con las baterías de plomo.
- En el evento de autonomía, que fue el principal foco del estudio, las baterías de litio superaron significativamente a las de plomo en varios aspectos críticos. Las baterías de litio se cargan en la mitad del tiempo (4 horas frente a 8 horas), ofrecen un voltaje ligeramente superior (66.95 V frente a 64.7 V), permiten recorrer más del doble de distancia (48.06 km frente a 22.27 km) y tienen un mayor tiempo de descarga (3:02 h frente a 1:25 h). Estas ventajas hacen que las baterías de iones de litio (Li-ion) sean una opción mucho más eficiente y práctica para aplicaciones que requieren alta autonomía y rápida recarga.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Recomendamos que futuras tesis consideren utilizar motores de 22.38 kW (30 HP) para lograr una potencia adecuada para competir. Además, es crucial verificar que la temperatura se mantenga por debajo de 60 grados Celsius. Si no se alcanza este objetivo,

será necesario incluir un sistema de refrigeración para la batería, asegurando así la eficiencia y el rendimiento óptimo del vehículo.

- Es recomendable realizar controles y mantenimientos periódicos del rendimiento del vehículo eléctrico y sus baterías para identificar áreas de mejora. Este proceso incluye monitorear el consumo de energía, la autonomía, el tiempo de carga y el tiempo de descarga. Con estos datos, se pueden hacer ajustes y optimizaciones que aseguren un funcionamiento eficiente y prolongado del vehículo.
- Es altamente recomendable realizar un dimensionamiento completo antes de instalar los motores y las baterías en el vehículo. Esto no solo previene gastos innecesarios en el futuro, sino que también asegura que el vehículo cumpla con los requisitos establecidos para la competencia de Fórmula SAE, evitando así posibles inconvenientes. El dimensionamiento detallado es crucial para asegurar que todos los componentes trabajen de manera eficiente y que el vehículo se mantenga dentro de los parámetros de peso y rendimiento especificados por las normativas de la competencia. Esto incluye la evaluación de factores como la distribución del peso, la capacidad de las baterías, la potencia de los motores y su integración con otros sistemas del vehículo. Es recomendable realizar el dimensionamiento cuando el vehículo esté completamente armado, incluyendo la carrocería. Esto permite una evaluación más precisa y realista de las necesidades del vehículo, asegurando que todos los componentes encajen y funcionen correctamente dentro del diseño final. Además, tener el vehículo completamente ensamblado ayuda a identificar y solucionar problemas potenciales que podrían surgir durante la competición.

## REFERENCIAS

- [1] SAE International, «About - Formula SAE Knowledge». Accedido: 28 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.sae.org/attend/student-events/formula-sae-knowledge/about>
- [2] Formula SAE, «FSAE Rules 2024 V1». Accedido: 28 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>
- [3] E. Carraro, M. Degano, M. Morandin, y N. Bianchi, «Formula SAE Electric Competition: Electrical Motor Design», *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, vol. 2017-January, pp. 6618-6622, dic. 2017, doi: 10.1109/IECON.2017.8217155.
- [4] J. Deng, C. Bae, A. Denlinger, y T. Miller, «Electric Vehicles Batteries: Requirements and Challenges», *Joule*, vol. 4, n.º 3, pp. 511-515, mar. 2020, doi: 10.1016/j.joule.2020.01.013.
- [5] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, y J. M. Marquez-Barja, «A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges», *Smart Cities 2021, Vol. 4, Pages 372-404*, vol. 4, n.º 1, pp. 372-404, mar. 2021, doi: 10.3390/SMARTCITIES4010022.
- [6] W. Liu, T. Placke, y K. T. Chau, «Overview of batteries and battery management for electric vehicles», *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4058-4084, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.03.016.
- [7] R. Ravi y U. Surendra, «Battery Management Systems (BMS) for EV», pp. 1-35, mar. 2021, doi: 10.4018/978-1-7998-7626-7.CH001.
- [8] Z. Y. Hou, P. Y. Lou, y C. C. Wang, «State of charge, state of health, and state of function monitoring for EV BMS», *2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics, ICCE 2017*, pp. 310-311, mar. 2017, doi: 10.1109/ICCE.2017.7889332.

- [9] M. Ghalkhani y S. Habibi, «Review of the Li-Ion Battery, Thermal Management, and AI-Based Battery Management System for EV Application», *Energies* 2023, *Vol. 16, Page 185*, vol. 16, n.º 1, p. 185, dic. 2022, doi: 10.3390/EN16010185.
- [10] M. Ghalkhani, F. Bahiraei, G. A. Nazri, y M. Saif, «Electrochemical–Thermal Model of Pouch-type Lithium-ion Batteries», *Electrochim Acta*, vol. 247, pp. 569-587, sep. 2017, doi: 10.1016/J.ELECTACTA.2017.06.164.
- [11] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, y G. Pasaoglu, «The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 292-308, jun. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.03.002.
- [12] F. Bahiraei, M. Ghalkhani, A. Fartaj, y G. A. Nazri, «A pseudo 3D electrochemical-thermal modeling and analysis of a lithium-ion battery for electric vehicle thermal management applications», *Appl Therm Eng*, vol. 125, pp. 904-918, oct. 2017, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.07.060.
- [13] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, y X. He, «Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review», *Energy Storage Mater*, vol. 10, pp. 246-267, ene. 2018, doi: 10.1016/J.ENSM.2017.05.013.
- [14] N. Shelke, C. Nilawar, y G. Udas, «(IRJET) e-2 Deputy General Manager», *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2023, Accedido: 2 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- [15] Secretaría Nacional de Planificación, «Plan-de-Creación-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado». pp. 1-122, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/09/Plan-de-Creación-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado.pdf>
- [16] C. Ponce, C. Fabricio, F. Dávila, y F. Sebastián, «CONSTRUCCIÓN DE UN MONOPLAZA ELÉCTRICO CON MOTORES INDEPENDIENTES», 2022, Accedido: 2 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/12920/2/04%20MAUT%20191%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>

- [17] Jimenez Jesus, «La fórmula Student, ¿Qué es?», jul. 2021, Accedido: 14 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://pitwalkers.com/formula-student/la-formula-student-que-es/>
- [18] CARMAN GRUPO, «FÓRMULA SAE/FÓRMULA STUDENT», may 2018, Accedido: 14 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://grupocarman.com/blog/2014/05/26/formula-sae/>
- [19] Bosch, «Manual de Baterías Bosch», may 2018.
- [20] J. B. Goodenough, «How we made the Li-ion rechargeable battery», *Nature Electronics 2018 1:3*, vol. 1, n.º 3, pp. 204-204, mar. 2018, doi: 10.1038/s41928-018-0048-6.
- [21] Albert Brufau, «Tensión nominal ». Accedido: 15 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://blog.igus.es/knowledge-base/que-es-la-tension-nominal/#:~:text=La%20tensi%C3%B3n%20nominal%20de%20una,\(valor%20medio\)%20del%20voltaje.](https://blog.igus.es/knowledge-base/que-es-la-tension-nominal/#:~:text=La%20tensi%C3%B3n%20nominal%20de%20una,(valor%20medio)%20del%20voltaje.)
- [22] Ortega Ignacio, «EL FUTURO DEL ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO\_IGNACIO\_ORTEGA\_AGUADO», ago. 2021.
- [23] J. M. Bertran, «Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas MEMORIA Autor: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona», 2017.
- [24] Marcos Crespo, «Estados de la Batería ». Accedido: 15 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://forococheselectricos.com/diccionario/soc-soh>
- [25] CAMBIO ENERGÉTICO, «PROFUNDIDAD DE DESCARGA (DoD): ¿QUÉ SIGNIFICA PARA TU BATERÍA Y POR QUÉ ES IMPORTANTE?», *ESPECIALISTAS EN AHORRO ENERGÉTICO Y RENOVABLES*, sep. 2022, Accedido: 28 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.cambioenergetico.com/blog/profundidad-descarga-bateria/>
- [26] TS2 Space Sp, «Tasa de Autodescarga: Baterías de estado sólido vs Baterías de iones de litio», oct. 2023, Accedido: 28 de noviembre de 2023. [En línea].

Disponible en: <https://ts2.space/es/tasa-de-autodescarga-baterias-de-estado-solido-vs-baterias-de-iones-de-litio/#gsc.tab=0>

- [27] Electric Vehicle Team, «A Guide to Understanding Battery Specifications», dic. 2008.
- [28] EverExceed, «BATERÍAS DE LITIO», feb. 2022, Accedido: 18 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://es.everexceed.com/blog/what-is-battery-energy-density-\\_b231](https://es.everexceed.com/blog/what-is-battery-energy-density-_b231)
- [29] Batteryfast, «Energía específica y densidad de energía», mar. 2023, Accedido: 18 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://batteryfast.com/technology/specific-energy-vs-energy-density/>
- [30] de Obaldía, E. Vanessa Quintero, y O. Auciello, «Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones Lithium Ion Batteries: features and applications», *Periodicidad: Semestral*, vol. 17, n.º 1, p. 2021, 2021.
- [31] Battery University, «BU-302: Configuraciones de Baterías en Serie y Paralelo», Battery University. Accedido: 12 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://batteryuniversity.com/article/bu-302-configuraciones-de-bater%C3%ADas-en-serie-y-paralelo>
- [32] Araceli (A.), «Baterías, ¿En Serie o en Paralelo?», SYSCOM.
- [33] VERTIV, «EL SURGIMIENTO DE LAS BATERÍAS DE IONES DE LITIO EN LOS CENTROS DE DATOS», 2022.
- [34] M. K. Tran, A. Dacosta, A. Mevawalla, S. Panchal, y M. Fowler, «Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA», *Batteries*, vol. 7, n.º 3, sep. 2021, doi: 10.3390/batteries7030051.
- [35] Zachariah Peterson, «Baterías para sistemas integrados: baterías de fosfato de hierro y litio frente a las de iones de litio», may 2019, Accedido: 15 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://resources.altium.com/es/p/lithium-iron-phosphate-battery-vs-lithium-ion-embedded-systems>

- [36] FHsolar&ledlberica, «Tipos de baterías de iones de litio», may 2020.
- [37] D. López Sánchez, «Tecnologías de Baterías», 2019.
- [38] S. Hwang, «Using In Situ and Operando Methods to Characterize Phase Changes in Charged Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide Cathode Materials», 2019.
- [39] M. Lowe, S. Tokuoka, T. Trigg, y G. Gereffi, «Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: Contributing CGGC researcher: Ansam Abayechi», 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.edf.org/home.cfm>
- [40] H. A. Gabbar, A. M. Othman, y M. R. Abdussami, «Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards», *Technologies*, vol. 9, n.º 2. MDPI, 1 de junio de 2021. doi: 10.3390/technologies9020028.
- [41] C. Valdivia Miranda y C. Monzo Sánchez Aleix Lopez Anton, «Diseño de un BMS para baterías de tecnología Li-ion», 2018.
- [42] M. F. R. Zwicker, M. Moghadam, W. Zhang, y C. V. Nielsen, «Automotive battery pack manufacturing – a review of battery to tab joining», *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 1, p. 100017, mar. 2020, doi: 10.1016/J.JAJP.2020.100017.
- [43] M. K. Tran, A. Dacosta, A. Mevawalla, S. Panchal, y M. Fowler, «Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA», *Batteries*, vol. 7, n.º 3, sep. 2021, doi: 10.3390/batteries7030051.
- [44] J. Hampton, «DIY Lithium Battery - Google Books». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.google.com.ec/books/edition/DIY\\_Lithium\\_Battery/RqVivQEACAAJ?hl=es-419](https://www.google.com.ec/books/edition/DIY_Lithium_Battery/RqVivQEACAAJ?hl=es-419)
- [45] Jiabaida, «ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE BATERÍAS COMERCIALMENTE DISPONIBLES PARA SU INTEGRACIÓN EN EL PROYECTO DE UNA MICRORRED AISLADA», 2024, Accedido: 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://jiabaidabms.com/blogs/content/jiabaida-sp17s005-smart-bms-10s-17s-wiring-diagram?\\_pos=1&\\_sid=ee3d642d8&\\_ss=r](https://jiabaidabms.com/blogs/content/jiabaida-sp17s005-smart-bms-10s-17s-wiring-diagram?_pos=1&_sid=ee3d642d8&_ss=r)



- [46] J. Chen, Z. Zhou, Z. Zhou, X. Wang, y B. Liaw, «Impact of Battery Cell Imbalance on Electric Vehicle Range», 2022, Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.inl.gov>
- [47] D. F. Tandy, J. Colborn, J. C. Bae, C. Coleman, y R. Pascarella, «The True Definition and Measurement of Oversteer and Understeer», *SAE Int J Commer Veh*, vol. 8, n.º 1, pp. 160-181, abr. 2015, doi: 10.4271/2015-01-1592.
- [48] Formula SAE, «FSAE Rules 2024 V1». Accedido: 28 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>
- [49] D. N. Hummes, J. Hunt, B. B. Hervé, P. S. Schneider, y P. M. Montanari, «A comparative study of different battery geometries used in electric vehicles», *Latin American Journal of Energy Research*, vol. 10, n.º 2, pp. 94-114, dic. 2023, doi: 10.21712/lajer.2023.v10.n2.p94-114.
- [50] S. Muslimin, Z. Nawawi, B. Yudho Suprpto, y T. Dewi, «Comparison of Batteries Used in Electrical Vehicles (A Review)», 2022.
- [51] A. A. Nkembí, M. Simonazzi, D. Santoro, P. Cova, y N. Delmonte, «Comprehensive Review of Energy Storage Systems Characteristics and Models for Automotive Applications», *Batteries*, vol. 10, n.º 3. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 1 de marzo de 2024. doi: 10.3390/batteries10030088.
- [52] N. Ghaeminezhad y M. Monfared, «Charging control strategies for lithium-ion battery packs: Review and recent developments», *IET Power Electronics*, vol. 15, n.º 5, pp. 349-367, abr. 2022, doi: 10.1049/pel2.12219.
- [53] «Charging Batteries from USB», 2005.
- [54] R. Dufo-López, T. Cortés-Arcos, J. S. Artal-Sevil, y J. L. Bernal-Agustín, «Comparison of lead-acid and li-ion batteries lifetime prediction models in stand-alone photovoltaic systems», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, n.º 3, pp. 1-16, feb. 2021, doi: 10.3390/app11031099.

- [55] TEKNOTRONIK, «Baterías de Litio/Litio-Ion/Li-Ion». Accedido: 17 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.todobaterias.es/blog-informativo-todobaterias/>

## ANEXOS

## 1.1 ANEXO I

## CALCULO DE LAS RESISTENCIAS

<b>Datos</b>	
Altura	1,25 m
Ancho	1,36 m
Coefficiente de forma (kf)	0,49
Coefficiente aerodinámico cx	0,44
Masa total	253,31 kg
Resistencia a la rodadura (frr)	0,015
Gravedad	9,807 m/s <sup>2</sup>
Densidad del aire (p)	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Eficiencia del motor	0,97
Eficiencia de transmisión	0,96
Velocidad a 45 km/h	12,5 m/s

Análisis dinámico del vehículo; como primer punto encontraremos el tiempo que el vehículo tarda en recorrer 22km a una velocidad de 45 km/h

$$\text{Tiempo} = \frac{\text{Distancia}}{\text{velocidad}} \rightarrow \text{Tiempo} = \frac{22 \text{ km}}{45 \text{ km/h}} \rightarrow \text{Tiempo} = 0,48 \text{ h} \rightarrow \text{Tiempo} = 29,33 \text{ min.}$$

Procedemos a realizar los cálculos de las resistencias

**Resistencia a la rodadura (N)**

$$F_{RR} = f_{RR} * m * g$$

Donde:

$f_{RR}$  = coeficiente de resistencia de la rodadura

m = masa total del vehículo (kg)

g = gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$$F_{RR} = ((0,015) * (253,31 \text{ kg}) * (9,807 \text{ m/s}^2))$$

$$F_{RR} = 37,2631 \text{ N}$$

**Resistencia aerodinámica (N)**

$$F_A = 0,5 * \rho * C_X * A * V^2$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del Aire (kg/m<sup>3</sup>)

$C_X$  = Coeficiente aerodinámico

A = Área frontal (m<sup>2</sup>)

kf = Coeficiente de forma

$V^2$  = Velocidad (m/s)

$$F_A = 0,5 * 1,225 * 1,25 * 1,36 * 0,49 * 0,44 * 12,5^2$$

$$F_A = 35,07 \text{ N}$$

**Resistencia a la aceleración(N)**

$$F_M = m * a$$

Donde:

m = masa (kg)

a = aceleración (m/s<sup>2</sup>)

Antes de calcular la resistencia a la aceleración debemos calcular la aceleración y:

Velocidad inicial = 0 m/s

Velocidad final = 12,5 m/s

Tiempo = 14 s

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{velocidad final} - \text{velocidad inicial}}{\text{tiempo}} \rightarrow \text{Aceleración} = \frac{12,5 \text{ m/s} - 0 \text{ m/s}}{14 \text{ s}}$$

$$\text{Aceleración} = 0,8928 \text{ m/s}^2$$

Con el valor de la aceleración calculamos la resistencia

$$F_M = 253,31 \text{ kg} * 0,8928 \text{ m/s}^2$$

$$F_M = 226,16 \text{ N}$$

En esta sección también podemos realizar la suma de las resistencias para obtener un valor general.

### Suma de las Resistencias (N)

$$F_{\text{total}} = F_{RR} + F_A + F_M + F_p$$

$$F_{\text{total}} = 37,2631 \text{ N} + 35,07 \text{ N} + 226,16 \text{ N}$$

$$F_{\text{total}} = 298,49 \text{ N}$$

Después de obtener los resultados de las resistencias procedemos a calcular la potencia de cada una de ellas.

## 1.2 ANEXO II

### CALCULO DE POTENCIAS

#### Potencia a la rodadura

$$P_R = F_{RR} * V$$

Donde:

$F_{RR}$  = Resistencia a la rodadura (N)

V = velocidad (m/s)

$$P_R = 37,26 \text{ N} * 12,5 \text{ m/s} \rightarrow P_R = 465,76 \text{ W}$$

$$P_R = 0,46576 \text{ kW}$$

#### Potencia aerodinámica

$$P_A = F_A * V$$

Donde:

$F_A$  = Resistencia a la aerodinámica(N)

V = velocidad(m/s)

$$P_A = 35,07 \text{ N} * 12,5 \text{ m/s} \rightarrow P_A = 438,37 \text{ W}$$

$$P_A = 0,43837 \text{ kW}$$

### Potencia a la aceleración

$$P_M = F_M * V$$

Donde:

$F_M$ : Resistencia a la aceleración(N)

V= velocidad (m/s)

$$P_M = 226,16 \text{ N} * 12,5 \text{ m/s} \rightarrow P_M = 2827 \text{ W}$$

$$P_M = 2,827 \text{ Kw}$$

Con los valores obtenidos de las potencias se procede a calcular la potencia necesaria

### Potencia Necesaria (N)

$$P_{necesaria} = \frac{P_{RR} + P_A + P_M + P_p}{\eta \text{ Transmision}}$$

Donde:

$\eta \text{ Transmision}$  = eficiencia de trasmisión

V= velocidad

$$P_{necesaria} = \frac{0,46576 \text{ Kw} + 0,43837 \text{ Kw} + 2,827 \text{ Kw}}{0,96}$$

$$P_{necesaria} = 3,886 \text{ Kw}$$

La potencia necesaria trasformamos en Hp

Donde:

1hp = 0,746 KW

$$\text{Hp} = \frac{3,886 \text{ Kw}}{0,746 \text{ Kw}} \rightarrow \text{Hp} = 5,21 \text{ hp}$$

Basándonos en los datos recopilados, podemos concluir que para iniciar el movimiento del vehículo se requiere una potencia de 3886,84 vatios, lo que equivale a 3,886 kilovatios (Kw). Si convertimos estos valores a caballos de fuerza (HP), obtenemos un total de 5.21 HP.

## 1.3 ANEXO III

## DIMENSIONAMIENTO DE LA BATERÍA

Características	
Potencia del motor	2000 W
Voltaje de operación del motor	60 V
Distancia del circuito	22 km
Velocidad Promedio	45 km/h
Voltaje de la celda	3,7 V
Capacidad de la celda	2,5 mAh

**Calculamos la Autonomía deseada(tiempo)**

$$\text{Autonomía(h)} = \frac{\text{distancia del circuito}}{\text{velocidad promedio}} \rightarrow \text{Autonomía(h)} = \frac{22\text{km}}{45\text{km/h}} \rightarrow \text{Autonomía(h)} = 0,48\text{h}$$

Trasformamos de horas a minutos

$$\text{Autonomía(min)} = 0,48\text{h} * 60\text{m} \rightarrow \text{Autonomía(min)} = 29,33 \text{ minutos}$$

**Calculamos la energía total que se necesita**

$$\text{Energía total (Wh)} = \frac{\text{potencia del motor(W)} * \text{autonomina deseada(h)}}{0,98}$$

$$\text{Energía total (Wh)} = \frac{2000(W) * 0,4888(h)}{0,98} \rightarrow \text{Energía total} = 997,55 \text{ Wh}$$

$$\text{Energía total} = \frac{997,55 \text{ Wh}}{1000} \rightarrow \text{Energía total} = 0,9975 \text{ KWh}$$

**Calculamos la capacidad de la batería**

$$\text{Capacidad batería (Ah)} = \frac{\text{Energía total (Wh)}}{\text{voltaje de operación del motor(V)}}$$

$$\text{Capacidad batería (Ah)} = \frac{997,55\text{Wh}}{60 \text{ V}} = 16,62 \text{ Ah}$$

**Numero de celdas en serie**

$$\#\text{serie} = \frac{\text{Voltaje de operación del motor(V)}}{\text{votaje de la celda(V)}} \rightarrow \#\text{serie} = \frac{60(V)}{3,7(V)} = 16,21 \approx 17 \text{ celdas en serie}$$

**Numero de celdas en paralelo**

$$\#\text{paralelo} = \frac{\text{Capacidad de la batería (Ah)}}{\text{Capacidad de la celda (Ah)}} \rightarrow \#\text{paralelo} = \frac{16,62 \text{ Ah}}{2,5 \text{ Ah}} = 6,64 \approx 7 \text{ celdas en paralelo}$$

## 1.4 ANEXO IV

## ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LAS BATERÍAS DE LITIO

<b>Marca</b>	<b>Samsung</b>	<b>LG</b>	<b>Tenpower</b>	<b>Roofers</b>
<b>Modelo</b>	INR18650-25R5 Samsung SDI	LGDBHE41865- INR18650HE4- ICR18650HE4	INR18650- 25PG	INR18650
<b>País de fabricación</b>	Corea del sur	Corea del sur	China	China
<b>Peso</b>	45 gramos	47 gramos	47 gramos	45,6 gramos
<b>Voltaje, carga máx.</b>	4,2 V	4,2 voltios	4,2 V	4,2 V
<b>Voltaje nominal</b>	3,6 V	3,6 V	3,6 V	3,7 V
<b>Voltaje de descarga</b>	2,5 V	2,5 V	2,5	2,7 V
<b>Capacidad</b>	2500 mAh	2500 mAh	2500 mAh	2500 mAh
<b>Corriente de carga constante máx.</b>	4 A	4 A	1,6 A	2,5 A
<b>Carga estándar constante</b>	1,25 A	1,25 A	1,25 A	1,25 A
<b>Densidad energética</b>	200 Wh/kg	191 Wh/kg	191 Wh/kg	200 Wh/kg
<b>Abreviatura química</b>	NMC	NMC	NCA	NMC
<b>Resistencia interna</b>	4 mΩ	4 mΩ	<20 mΩ	< 25 mΩ
<b>Precio por unidad</b>	12 dólares	11 dólares	5 dólares	6 dólares

[55]