



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

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA DE ALTO RENDIMIENTO PARA UN VEHÍCULO TIPO FORMULA STUDEN UTILIZANDO DOS MOTORES DE 4000W CADA UNO”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTORES:

Franklin Jhoel Leitón Coral

Samuel Xavier Pozo Mosquera

DIRECTOR:

Ing. Erik Paúl Hernández Rueda, MSc.

Ibarra – Ecuador 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Leitón Coral Franklin Jhoel

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Pozo Mosquera Samuel Xavier

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA DE ALTO RENDIMIENTO PARA UN VEHÍCULO TIPO FORMULA STUDEN UTILIZANDO DOS MOTORES DE 4000W CADA UNO”
AUTOR (ES):	Leitón Coral Franklin Jhoel Pozo Mosquera Samuel Xavier
FECHA: DD/MM/AAAA	09/04/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO AUTOMOTRIZ
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Jorge Luis Melo Obando, MSc Ing. Erik Paúl Hernández Rueda, MSc

2. 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 09 días del mes de abril de 2026

EL AUTOR (ES):

(Firma).....

Nombre: Leitón Coral Franklin Jhoel

(Firma).....

Nombre: Pozo Mosquera Samuel Xavier

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 09 de abril de 2026

Ing. Erik Paúl Hernández Rueda, 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.

f)

Ing. Erik Paúl Hernández Rueda, MSc.

C.C.: 1002978060

DEDICATORIA

Hoy, al cerrar este capítulo de mi formación académica, dedico este logro a mi madre Luz por su apoyo incondicional y por ser la fuente de los consejos que me guiaron hasta este momento, a mi padre Franklin, por su sabiduría y su particular manera de enseñarme a enfrentar los retos.

A mi familia, por ser mi fuente de inspiración y mi apoyo inquebrantable. Gracias por formar parte de este proceso, por sus palabras de aliento y por celebrar mis pequeños avances como grandes victorias. No existen palabras suficientes para agradecerles el privilegio de contar con su amor en cada etapa de mi vida.

A mis amigos y a cada persona que cruzó mi camino en momentos determinantes. Gracias por creer en mí, su presencia hizo que este proceso fuera mucho más humano y llevadero. Este logro también les pertenece, pues lleva un poco de cada uno de ustedes.

Franklin Leitón

DEDICATORIA

Dedicado especialmente al creador del universo como dice Colosenses 1:16 *"Porque en él fueron creadas todas las cosas, las que hay en los cielos y las que hay en la tierra, visibles e invisibles; sean tronos, sean dominios, sean principados, sean potestades; todo fue creado por medio de él y para él."*

Quiero dedicar en gran parte al ingeniero Paúl quien confió en que junto a Franklin lograríamos realizar este proyecto y lo sacaríamos adelante, gracias por ese ánimo que supo darnos ya que muchas veces se tornó complicado el poder realizar pero allí estuvo para indicarnos o darnos opciones para seguir con cada complicación sin rendirnos.

También quiero dedicarlo a mi Primo Andrés Posso quien supo darme consejo como el que da un padre y supo ser ese primo mayor aconsejando de tal forma en que pueda ver reflejado a Cristo en su corazón, a mis primos, Ian, Emi y Anto quienes me ayudaron en el tiempo que pude pasar con ellos y también a Lore que me animaba.

Lo dedica a mis padres quienes dieron de su tiempo, servicio, consuelo, cariño, apoyo y ánimo para seguir y no rendirme, su sabio consejo de buscar a Dios en cualquier momento a pesar de las dificultades, dedicado a mis hermanas, mis amigos, primos por su pronto auxilio o acolite cuando me veían realizando alguna modificación o cuando salíamos a realizar las pruebas.

También lo quiero dedicar a cada uno de los estudiantes que próximamente vendrán, que estudiarán y se apasionarán por la carrera, por los vehículos, no duden en seguir, no duden en preguntar nada a cualquier profesor porque ellos sabrán dar una respuesta que los guiará a una salida, lo dedico al equipo que hizo los planes y trámites para poder inscribir al prototipo a la competencia de formula student que si Dios lo permite participaremos en 2027, espero podamos seguir aprendiendo y seguirnos viendo.

Samuel Pozo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por ser el motor de mi superación y por darme las herramientas para cumplir este sueño profesional, su apoyo inquebrantable y sus enseñanzas de vida han sido fundamentales para llegar a este punto. De igual manera, extendiendo mi gratitud a mi familia y amigos, quienes con sus consejos y motivación constante me impulsaron a lograr este objetivo.

A mi tutor de tesis, Ing. Paul Hernández, por su valiosa dirección y asesoría a lo largo de este proyecto. Gracias por compartir su conocimiento, por la paciencia brindada en cada etapa de la investigación y por sus correcciones acertadas, las cuales fueron fundamentales para alcanzar la calidad académica de este trabajo.

A mi compañero y gran amigo, Samuel, por su amistad incondicional a lo largo de estos años. Gracias por las jornadas de desvelo y la dedicación compartida en cada reto que enfrentamos juntos, tu apoyo fue determinante para que este proceso fuera más llevadero y exitoso. Es un honor compartir este logro contigo.

Franklin Leitón

AGRADECIMIENTO

Primero quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de estudiar Ingeniería Automotriz y permitirme culminar esta prestigiosa carrera con su ayuda. Le doy gracias por cada experiencia vivida, por los compañeros que puso en mi camino, por las amistades que formé y por los ingenieros de quienes pude aprender a lo largo de su trayectoria profesional. A cada uno de ellos les agradezco por su amistad, cariño, bromas y enseñanzas.

De manera especial, agradezco a Franklin, mi amigo y compañero de lucha en esta carrera, quien ha estado a mi lado apoyándome, animándome a seguir adelante y motivándome a mejorar en muchos aspectos, además de compartir conmigo su conocimiento y experiencia.

Agradezco profundamente a mi familia, en especial a mis padres, por su apoyo incondicional, sus oraciones, su confianza y su constante ánimo. Gracias por recordarme que, aunque haya días difíciles, siempre hay una nueva oportunidad para seguir adelante con la ayuda de Dios. También agradezco a mis hermanas Raque, Caro y Vane, quienes estuvieron presentes en cada desvelo y en los momentos en los que sentía que no podía continuar. De igual forma, agradezco a César y Kevin por su apoyo durante este proceso.

A todos mis amigos que formaron parte de este proyecto, gracias por su ayuda y compañía. A Jonathan, quien siempre estuvo dispuesto a dar una mano; a Megan, Diego, mi primo Carlitos, Jonas, Kevin, Cesarín, Vane, mi padre, Silvi, Héctor, Ruthis, Alexis, Bryan, Dani y Esteban, quienes fueron parte de esta gran experiencia y aprendizaje.

Quiero hacer un agradecimiento especial a mi primo Andrés y a toda su familia, quienes fueron un pilar fundamental para avanzar y culminar este proyecto. Su apoyo, consejos y palabras de ánimo significaron mucho para mí en momentos difíciles.

Finalmente, agradezco a los ingenieros Paúl, Jorge, Ramiro, Freddy, Margarita y César, así como a todos los docentes que guiaron este proceso. También a quienes colaboraron revisando el documento y a los talleres y personas que hicieron posible este proyecto.

A todos, muchas gracias. Que Dios los bendiga siempre.

Samuel Pozo

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación se fundamenta en la necesidad de superar las limitaciones de rendimiento dinámico y autonomía del prototipo de la Universidad Técnica del Norte mediante una transición integral hacia la movilidad eléctrica de alto desempeño. El objetivo general consistió en implementar un sistema de propulsión eléctrica de alto rendimiento, integrado por dos motores de 5000 W cada uno, optimizando el diseño del tren motriz para maximizar la competitividad del vehículo en pista.

La metodología empleada abarcó fases de dimensionamiento y selección técnica de componentes, la instalación de un paquete de baterías de litio y la integración de sistemas en el chasis. Para la validación de resultados, se ejecutó una evaluación técnica exhaustiva mediante instrumentación satelital y pruebas de potencia en un dinamómetro de chasis Vamag, siguiendo protocolos de medición estandarizados. Los resultados evidenciaron un incremento superior al 634% en la potencia máxima, lo que permitió una reducción del 10.18% en el tiempo de ejecución de la prueba de Skidpad. Asimismo, se registró una mejora cercana al 100% en la autonomía total y un aumento considerable en la velocidad punta y el par motor.

La implementación de este sistema no solo elevó las prestaciones mecánicas, sino que validó la viabilidad del prototipo para cumplir con las exigencias de las normativas internacionales de la Formula SAE, consolidando una plataforma tecnológica de vanguardia para competencias de ingeniería automotriz.

Palabras clave: Propulsión eléctrica, Formula SAE, dinamómetro, autonomía, par motor.

ABSTRACT

The present research is based on the need to overcome the limitations in dynamic performance and range of the prototype from the Universidad Técnica del Norte through a comprehensive transition toward high-performance electric mobility. The general objective was to implement a high-performance electric propulsion system, composed of two 4000 W motors each, optimizing the drivetrain design to maximize the vehicle's competitiveness on the track.

The methodology used included phases of component sizing and technical selection, the installation of a lithium battery pack, and the integration of systems into the chassis. For the validation of results, a comprehensive technical evaluation was carried out using satellite instrumentation and power tests on a Vamag chassis dynamometer, following standardized measurement protocols. The findings showed an increase of more than 634% in maximum power, which enabled a 10.18% reduction in the execution time of the Skidpad test. Likewise, an improvement of nearly 100% in total range was recorded, along with a considerable increase in top speed and torque.

The implementation of this system not only enhanced the mechanical performance but also validated the feasibility of the prototype to meet the requirements of the international regulations of Formula SAE, consolidating a cutting-edge technological platform for automotive engineering competitions.

Keywords: Electric propulsion, Formula SAE, dynamometer, range, torque.

LISTA DE SIGLAS

- PWM.** Modulación por Ancho de Pulso (Pulse Width Modulation).
- BMS.** Sistema de Gestión de Baterías (Building Management System).
- PMSM.** Motores Síncronos de Imanes Permanentes (Permanent Magnet Synchronous Motor).
- CAN.** Red de Área del Controlador (Controller Area Network).
- KERS.** Sistema de Recuperación de Energía Cinética (Kinetic Energy Recovery System).
- EPS.** Sistema de Propulsión Eléctrica (Electric Propulsion System).
- ESS.** Sistema de Almacenamiento de Energía (Energy Storage System).
- LiFePO₄.** Batería de Litio-Hierro-Fosfato.
- LiCoO₂.** Batería de Óxido de Litio y Cobalto.
- NiMH.** Batería de Níquel-Hidruro Metálico.
- VRLA.** Batería Plomo-Ácido Regulada por Válvula (Valve-Regulated Lead-Acid).
- CFD.** Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics).
- CATIA.** Aplicación Interactiva de Tres Dimensiones Asistida por Computadora (Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application).
- PM.** Motores de Imanes Permanentes (Permanent Magnets).
- ESC.** Controlador Electrónico de Velocidad (Electronic Speed Controller).
- SoC.** Estado de Carga (State of Charge).
- SoH.** Estado de Salud (State of Health).
- SoE.** Estado de Energía (State of Energy).
- SoP.** Estado de Potencia (State of Power).
- SoL.** Estado de Vida (State of Life).

IP. Protección de Ingreso (Ingress Protection).

SAE. Sociedad de Ingenieros Automotrices (Society of Automotive Engineers).

ÍNDICE DE CONTENIDO

LISTA DE SIGLAS.....	11
ÍNDICE DE TABLAS.....	16
ÍNDICE DE FIGURAS	17
CAPÍTULO I.....	19
1. INTRODUCCIÓN	19
1.2 Problema de investigación.....	19
1.3 Objetivos.....	20
1.3.1 Objetivo general.....	20
1.3.2 Objetivos específicos.....	20
1.4 Formulación del problema de investigación.....	20
1.5 Justificación	21
CAPÍTULO II.....	22
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1 Antecedentes	22
2.2 Formula SAE	24
2.2.1 Pruebas Formula SAE	25
2.2.2. Categorías de la competencia.....	27
2.2.3 Dinámica vehículo tipo Formula Student.....	28
2.2.4 Aerodinámica vehículo tipo Formula Student.....	29
2.3 Principios básicos.....	30
2.3.1 Sistema de propulsión eléctrica.....	30
2.3.2 Sistema de almacenamiento de energía.....	31
2.4 Baterías	31
2.4.1 Baterías de Ion de Litio	31
2.4.2 Baterías de Polímero de Litio	32
2.4.3 Batería de Níquel-Cadmio	32
2.4.4 Baterías de litio-hierro-fosfato.....	33
2.4.5 Batería de óxido de litio y cobalto.....	33
2.4.6 Batería de níquel-hidruro metálico.....	34
2.4.7. Batería plomo-ácido regulada por válvula.....	35
2.5 Motores eléctricos.....	36
2.5.1 Motor de imanes permanentes.....	36

2.5.2	Motor de corriente alterna síncrono.....	37
2.5.3	Los motores sin escobillas (<i>Brushless</i>).....	37
2.6	Controlador	38
2.7	Gestión térmica	38
2.7.1	Sistema de recuperación de energía cinética (KERS)	39
2.7.2	Sistema de administración de batería	39
CAPÍTULO III		41
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	41
3.1	ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	41
3.2	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN MATERIALES, EQUIPOS Y SOFTWARE.....	42
3.2.1	Motor eléctrico	42
3.2.2	Controlador.....	43
3.2.3	Breaker.....	44
3.2.4	Bornera	45
3.2.5	Batería de Ion de Litio	46
3.2.6	Cargador	47
3.2.7	Formula Student	48
3.2.8	Registrador de Datos	49
3.2.9	Dinamómetro	50
3.3	METODOLOGÍA	52
3.3.1	Recopilación y análisis de información	54
3.3.2	Pruebas del sistema de propulsión actual.....	54
3.3.3	Dimensionamiento del nuevo sistema de propulsión	54
3.3.3.1	Relación de Transmisión	55
3.3.3.2	Selección de Motores.....	55
3.3.3.3	Selección de Baterías.....	58
3.3.4	Prueba para Verificar el Sistema de Suspensión.....	60
3.3.4.1	SkidPad.....	60
3.3.4.2	Prueba de Rebote Prolongado.....	61
3.3.5	Prueba para Verificar el Sistema de Frenos	62
3.3.5.1	Distancia de Frenado	62
a.	Velocidad del Vehículo	62
b.	Coeficiente de Adherencia de los Neumáticos	62

c. Gravedad.....	62
d. Inclinación de la Calzada.....	62
CAPÍTULO IV	64
4. RESULTADOS	64
4.1 Resultados Prueba Skidpad	64
4.2 Resultados Prueba de Frenado.....	65
4.3 Resultados Pruebas en el Dinamómetro	66
4.4 Resultados Prueba Carga y Descarga	66
4.5 Resultados Prueba Resistencia de 22 km	67
4.6 Resultados Prueba de Aceleración	68
CAPÍTULO V.....	70
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
5.1 Análisis Prueba Skidpad.....	71
5.2 Análisis Prueba de Frenado	72
5.3 Análisis Pruebas de Dinamómetro	74
5.4 Análisis Prueba Carga y Descarga.....	75
5.5 Análisis Prueba Resistencia de 22 km.....	77
5.6 Análisis Prueba Aceleración.....	78
6. CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXOS	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Comparación de componentes de la batería</i>	35
Tabla 2. <i>Especificaciones Técnicas del motor eléctrico</i>	42
Tabla 3. <i>Especificaciones Técnicas del controlador</i>	43
Tabla 4. <i>Especificaciones Técnicas del interruptor</i>	44
Tabla 5. <i>Especificaciones Técnicas de la Bornera</i>	45
Tabla 6. <i>Especificaciones de Baterías de Ion de Litio</i>	46
Tabla 7. <i>Especificaciones Cargador para Baterías Ion de Litio</i>	47
Tabla 8. <i>Dimensiones del Prototipo Formula Student</i>	48
Tabla 9. <i>Especificaciones Técnicas del Registrador de datos TSI GL-770</i>	50
Tabla 10. <i>Especificaciones Técnicas del Dinamómetro Vamag</i>	51
Tabla 11. <i>Resultados – Prueba Skidpad</i>	64
Tabla 12. <i>Resultados – Distancia de Frenado</i>	65
Tabla 13. <i>Resultados – Dinamómetro</i>	66
Tabla 14. <i>Resultados – Prueba Carga y Descarga</i>	67
Tabla 15. <i>Resultados – Prueba Resistencia de 22 km</i>	68
Tabla 16. <i>Resultados – Prueba de Aceleración</i>	69
Tabla 17. <i>Comparación – Prueba Skidpad</i>	71
Tabla 18. <i>Comparación – Prueba de Frenado</i>	73
Tabla 19. <i>Comparación – Prueba de Dinamómetro</i>	74
Tabla 20. <i>Comparación – Prueba de Carga y Descarga</i>	76
Tabla 21. <i>Comparación – Prueba de Resistencia de 22 km</i>	77
Tabla 22. <i>Comparación – Prueba de Aceleración</i>	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Dinámica de Fluidos Computacional</i>	29
Figura 2. <i>Los componentes principales del EPS</i>	30
Figura 3. <i>Composición de Batería de Iones de Litio</i>	32
Figura 4. <i>Batería de níquel-cadmio</i>	33
Figura 5. <i>Funcionamiento de una batería de Óxido de Litio y Cobalto</i>	34
Figura 6. <i>Batería de níquel-hidruro metálico</i>	35
Figura 7. <i>Estructura de un motor de imanes permanentes</i>	37
Figura 8. <i>Motor sin Escobillas</i>	38
Figura 9. <i>Descripción general de los componentes de hardware y software del BMS</i> .	40
Figura 10. <i>Motor eléctrico de 5000W</i>	43
Figura 11. <i>Controlador para el motor eléctrico de 5000W</i>	44
Figura 12. <i>Interruptor ABB automático - DC</i>	45
Figura 13. <i>Placa Bornera K1M10</i>	46
Figura 14. <i>Baterías de Ion de Litio</i>	47
Figura 15. <i>Cargador para las baterías de Ion de Litio</i>	48
Figura 16. <i>Prototipo Formula Student</i>	49
Figura 17. <i>Registrador de datos TSI GL-770</i>	50
Figura 18. <i>Dinamómetro Vamag</i>	51
Figura 19. <i>Diagrama de flujo</i>	53
Figura 20. <i>Circuito de Skidpad</i>	61
Figura 21. <i>Comparación de tiempos en la prueba de Skidpad</i>	72
Figura 22. <i>Comparación de Prueba de Frenado</i>	73
Figura 23. <i>Comparación de Prueba de Dinamómetro</i>	75
Figura 24. <i>Comparación de Prueba de Carga y Descarga</i>	76
Figura 25. <i>Comparación de Prueba de Resistencia de 22 km</i>	78
Figura 26. <i>Comparación de Prueba de Aceleración</i>	79

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Relación de Transmisión	55
Ecuación 2. Fuerza de Resistencia Aerodinámica	56
Ecuación 3. Fuerza de la Normal.....	57
Ecuación 4. Fuerza de Fricción	57
Ecuación 5. Resistencia a la Rodadura.....	57
Ecuación 6. Potencia Total	58
Ecuación 7. Voltaje.....	59
Ecuación 8. Corriente	59
Ecuación 9. Energía Consumida por kilómetro.....	60
Ecuación 10. Autonomía	60
Ecuación 11. Distancia de Frenado	63
Ecuación 12. Porcentaje de Cambio	70

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

Tema

Implementación de un sistema de propulsión eléctrica de alto rendimiento para un vehículo tipo Formula Student utilizando dos motores de 4000W cada uno.

El problema

1.2 Problema de investigación.

En la actualidad, los motores eléctricos han cobrado relevancia en la industria automotriz debido a su capacidad de mejorar la eficiencia energética. En la Universidad Técnica del Norte, se ha manifestado un creciente interés por el desarrollo de EV, en los cuales se contempla el vehículo tipo Formula Student. Sin embargo, el sistema de propulsión que utiliza este prototipo de la universidad no logra proporcionar el rendimiento necesario para alcanzar la velocidad necesaria que establece el reglamento de la Formula SAE.

En este contexto, los EV de Formula Student deben cumplir con estrictos estándares de desempeño que incluyen una aceleración eficiente, velocidades competitivas y la capacidad de mantener un rendimiento sostenido en pruebas de resistencia para poder competir. Estas exigencias técnicas hacen necesario equilibrar potencia y eficiencia en un espacio limitado, lo que plantea desafíos en la selección e integración de los componentes del sistema de propulsión [1].

Por ello, este trabajo busca abordar estas limitaciones a través de una selección adecuada de los componentes, un diseño optimizado y pruebas de rendimiento, se pretende mejorar significativamente el desempeño del vehículo, asegurando su competitividad en las diferentes pruebas dinámicas y estáticas de la competencia.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Implementar un sistema de propulsión eléctrica de alto rendimiento para un vehículo tipo Formula Student utilizando dos motores de 4000W cada uno, optimizando el diseño para lograr un desempeño adecuado.

1.3.2 Objetivos específicos

- Dimensionar y seleccionar los componentes del sistema de propulsión.
- Implementar el sistema de motores y baterías de litio.
- Integrar el sistema de propulsión al vehículo Formula Student.
- Evaluar el rendimiento del sistema de propulsión.

1.4 Formulación del problema de investigación.

La presente investigación se centrará en la implementación de un sistema de propulsión para el vehículo tipo Formula SAE existente en la carrera de Ingeniería Automotriz. Para ello, se llevarán a cabo las pruebas necesarias del sistema de propulsión actual, con el fin de compararlo con el que se implementará en el futuro. Las pruebas se realizarán siguiendo el reglamento de la Formula SAE, para determinar si la propulsión cumple con los requerimientos establecidos por la competencia.

Para que el vehículo cumpla con los requisitos de propulsión exigidos en estos eventos, deberá ajustarse a ciertos parámetros establecidos por la SAE, como alcanzar una velocidad mínima de 30 km/h en condiciones de pista seca. Por esta razón, la investigación se desarrollará conforme a las reglas establecidas por la SAE, asegurando que la implementación del sistema sea aprobada durante las revisiones técnicas de este evento [2].

1.5 Justificación

Este tema de investigación se alinea directamente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 9 que habla sobre industria, innovación e infraestructura, ya que, al ser un motor eléctrico, contribuye a la creación de soluciones tecnológicas avanzadas en la industria automotriz. También promueve la infraestructura sostenible y la investigación tecnológica y encaja directamente con el propósito de mejorar el rendimiento de este sistema.

Además, el trabajo se relaciona con el objetivo 7 del Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador, destacando el uso de tecnologías sostenibles que maximizan el rendimiento energético del sistema de propulsión.

Este proyecto aporta a la Universidad y en efecto a la Carrera de Ingeniería Automotriz ya que es innovador, el objetivo es lograr que el vehículo cumpla con lo requerido en el apartado de la Formula SAE en las cuales se realizarán pruebas estáticas que incluyen diseño de ingeniería, algunas pruebas dinámicas que entre ellas es la de aceleración, autocross entre otras, así lo mencionan estudiantes que realizaron estudios sobre el sistema de propulsión más conveniente para un vehículo tipo Formula SAE [3].

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En el contexto de las competencias automovilísticas de alto rendimiento, la Formula SAE se ha consolidado como una plataforma clave para la innovación en EV, promoviendo desde 2010 la movilidad sostenible. Esta competencia internacional ha impulsado el desarrollo de EV equipados con motores de alta densidad de potencia, optimizando la eficiencia y el rendimiento al tiempo que se minimizan el peso y la inercia rotacional. Entre los componentes críticos para garantizar el desempeño óptimo se encuentran los inversores de modulación por ancho de pulso que por sus siglas PWM (Pulse Width Modulation) y los sistemas de refrigeración avanzada, que contribuyen a la fiabilidad y competitividad en estas plataformas de competición [4].

En el desarrollo de un vehículo tipo Formula Student, se implementó un sistema de propulsión eléctrica de alto rendimiento, integrando módulos electrónicos clave como el de potencia y el módulo del volante, ambos conectados a través de un bus CAN. Estos módulos no solo gestionan funciones críticas del vehículo, sino que optimizan la interfaz entre el piloto y el vehículo, mejorando la confiabilidad general del sistema. Las pruebas en laboratorio y en competencias reales, como las celebradas en Silverstone y Cataluña, demostraron un control eficiente y una notable fiabilidad en condiciones de alta demanda [5].

Cabe destacar que en el diseño de sistemas de propulsión eléctrica es la integración de motores sin escobillas conectados al eje trasero del vehículo. En un proyecto de Formula Student, se implementó un sistema de dos motores brushless (motores sin escobillas), teniendo en cuenta las limitaciones de espacio, peso y presupuesto. A través de cálculos analíticos y simulaciones, se optimizó el rendimiento para lograr un equilibrio entre costo y eficiencia, lo que resultó en una mayor densidad de potencia y simplificación del sistema. El vehículo demostró ser competitivo dentro de los parámetros establecidos por las reglas de la competición [6].

El desarrollo de un sistema de propulsión eléctrica también involucra la correcta selección de componentes esenciales como la batería. En un vehículo tipo Formula

Student, se integró un sistema compuesto por una batería de 72V LiFePO₄ (batería de litio-ferrofosfato), un sistema de gestión de baterías (BMS), un controlador de motor y otros componentes auxiliares. Las pruebas realizadas destacaron la importancia del BMS para proteger las celdas y evitar daños, aunque también se evidenció la necesidad de un cargador específico para baterías de LiFePO₄. Este sistema, ha permitido estudiar trenes motrices eléctricos en entornos de laboratorio, facilitando el análisis práctico de su funcionamiento [7].

El proceso de carga de las baterías es fundamental para el rendimiento de los EV. En este contexto, se desarrolló un modelo en Simulink para simular el proceso de carga CC/CV (corriente constante/voltaje constante), optimizando el tiempo de carga y garantizando la seguridad del sistema. Las simulaciones mostraron tiempos de carga efectivos para diferentes corrientes, validando la viabilidad del sistema de carga. Esta investigación es aplicable no solo en prototipos de competición, sino también en el avance de la tecnología de EV en general, contribuyendo a la transición hacia soluciones más sostenibles [8].

En cuanto al diseño de las baterías, se estableció un procedimiento específico para un vehículo tipo Formula Student, que incluyó la selección de celdas óptimas y el establecimiento de esquemas de conexión adecuados. Utilizando modelado matemático, se calcularon parámetros del paquete de baterías, resultando en un sistema con alta densidad energética gravimétrica. Este diseño permitió optimizar tanto el peso como la eficiencia y el rendimiento del sistema de propulsión eléctrica, ajustándose a los requerimientos de las competiciones de Formula Student [9].

Además, la eficiencia mecánica de los motores eléctricos es fundamental en el rendimiento de estos vehículos. En un proyecto de Formula Student, se optimizó la eficiencia del motor de tracción mediante técnicas avanzadas de diseño, selección de materiales y gestión térmica. Las simulaciones y análisis de pérdidas resultaron en mejoras significativas en la eficiencia energética y en la densidad de potencia, lo que permitió reducir el peso del sistema y mejorar el rendimiento general, cumpliendo con las exigencias de las competiciones de alto rendimiento [10].

El diseño y la optimización de motores sin escobillas para vehículos tipo Formula SAE ha sido un desafío abordado con éxito mediante simulaciones avanzadas. En un proyecto específico, se utilizaron algoritmos evolutivos y simulaciones de elementos finitos para maximizar la densidad de potencia y la eficiencia de los motores. Los resultados mostraron un aumento del 67% en el rendimiento del motor, lo que mejoró significativamente el desempeño del vehículo en las competencias, demostrando la viabilidad de este tipo de soluciones en el ámbito automotriz de alto rendimiento [11].

En la optimización de los sistemas de propulsión eléctrica, el desarrollo de Motor Síncrono de Imanes Permanentes (PMSM por sus siglas) ha sido fundamental. En un proyecto para vehículos tipo Formula SAE, se diseñó un motor compacto de 10 polos y 12 ranuras utilizando materiales avanzados como imanes NdFeB (imanes de neodimio, hierro y boro) y aleaciones de hierro-cobalto, lo que permitió maximizar la potencia y la eficiencia del sistema. El motor alcanzó 22 Nm de torque y 20 kW de potencia con solo 3.8 kg de peso, cumpliendo con los objetivos de alta densidad de potencia y baja pérdida térmica, lo que fue clave para su integración en el vehículo [12].

Finalmente, el diseño de un motor PMSM específico para un vehículo tipo Formula Student incluyó análisis electromagnéticos, térmicos y mecánicos mediante el uso de herramientas de simulación como Motor-CAD. Se evaluaron diferentes configuraciones de ranura-polo y tipos de rotores, seleccionando el diseño óptimo para maximizar el torque y minimizar las pérdidas de energía. Este diseño cumplió con las normativas de la competencia y permitió al vehículo un desempeño dinámico excepcional, destacándose en pruebas de durabilidad y rendimiento [13].

2.2 Formula SAE

La Formula SAE es una competencia, en la cual participan equipos de estudiantes universitarios de pregrado y posgrado en ingeniería, demostrando el rendimiento de vehículos pequeños de estilo fórmula, estos son sometidos a una serie de eventos fuera y dentro de pista con un tiempo limitado [14]. En cada una de estas pruebas se da la

oportunidad a cada uno de los equipos para poder visualizar su capacidad en la ingeniería, comparando con otros equipos.

El objetivo principal de esta competencia es permitir a los estudiantes de ingeniería automotriz y deportes de motor adquirir experiencia práctica, fomentando simultáneamente la innovación y la formación de futuros ingenieros. Anualmente, alrededor de 900 equipos a nivel mundial diseñan y construyen un vehículo de competición de Fórmula desde sus cimientos, optimizando características fundamentales como la aerodinámica [15].

Esta experiencia brinda una oportunidad única para que los estudiantes pongan en práctica sus conocimientos teóricos en un entorno real, desarrollando competencias clave en áreas como la ingeniería, la dirección de proyectos y la colaboración en equipo. A lo largo de la competición, los equipos participan en eventos tanto estáticos como dinámicos, sumando puntos, y al finalizar, el equipo que acumule la mayor cantidad de puntos es proclamado vencedor [16].

2.2.1 Pruebas Formula SAE

Según *Motor y Competición* menciona los tipos de pruebas que consta la Formula SAE, las cuales evalúan a los vehículos que compiten, las cuales se dividen en pruebas dinámicas y estáticas, estos vehículos deben ser valorados según estas pruebas para determinar su seguridad, fiabilidad y la competición del vehículo demostrando la capacidad de los equipos para las siguientes pruebas [17]:

2.2.1.1 Pruebas Estáticas:

- **Verificaciones técnicas:** Las verificaciones técnicas consisten en una serie de inspecciones que se realizan para garantizar que el vehículo cumple con las normativas de seguridad y desempeño establecidas por la competición. Se evalúan aspectos como las condiciones de seguridad, pruebas de inclinación, la seguridad del piloto y adecuaciones a las reglas.

- **Prueba de diseño:** Esta prueba consiste en dos fases, la primera el equipo debe defender su vehículo ante 4 jueces expertos en ingeniería automotriz, en esta parte, se explica el proceso de diseño, las decisiones técnicas tomadas, y cómo se resolvieron problemas específicos de ingeniería. En la segunda parte, solo los mejores 14 equipos avanzan, donde la defensa del diseño es más exhaustiva. Durante 4 horas, el equipo se enfrenta a 30 jueces, quienes hacen preguntas más detalladas y complejas sobre todos los aspectos del vehículo.
- **Presentación de marketing:** Esta parte de la competición se enfoca en la habilidad del equipo para "vender" el vehículo como si fuera un producto comercial. El equipo debe realizar una exposición de 15 minutos ante un jurado compuesto por profesionales de marketing. Los aspectos clave de esta prueba incluyen el segmento de mercado, ventajas competitivas, propuesta de valor.
- **Análisis de costes:** En esta prueba, el equipo debe defender un informe detallado que previamente han preparado, el cual desglosa los costes de fabricación del vehículo. El análisis incluye costes de las piezas, coste de ensamblaje y habilidad del vehículo.

2.2.1.2 Pruebas Dinámicas:

- **Aceleración:** Se trata de recorrer 75 metros en el menor tiempo posible, con un máximo de 5.8 segundos. Cada vehículo tiene dos intentos, cada uno con un conductor distinto. Derribar dos conos de los que delimitan la pista resulta en la exclusión de la prueba.
- **Skydpad:** El coche debe recorrer un circuito en forma de ocho, compuesto por dos circunferencias de 18.25 metros de radio y 3 metros de ancho. Debe completar dos vueltas a una circunferencia en sentido horario y dos a la otra en sentido antihorario. Por cada cono derribado se añaden 0.25 segundos al tiempo total.
- **Autocross:** Se corre en un circuito de aproximadamente 800 metros, que incluye rectas, curvas de diferentes radios, horquillas y slalom. El objetivo es recorrer el

circuito en el menor tiempo posible. Cada cono derribado añade 2 segundos al tiempo realizado.

- **Resistencia y economía del combustible:** El vehículo debe completar 22 vueltas a un circuito con características similares al de autocross, pero más largo. Además del tiempo, se evalúa el consumo de combustible. Por cada cono derribado se añaden 2 segundos, y por errores en el slalom, 20 segundos.

2.2.2. Categorías de la competencia

Según el Club del Automóvil Nebirja indica que para el sistema de competición para vehículos de Fórmula Student está dividido en varios niveles que permiten a los equipos progresar desde el diseño inicial hasta la fabricación de un monoplaza completamente funcional a continuación, se mostrarán los diferentes rangos que existen [18]:

- **Nivel 3:** Este es un nivel inicial para los equipos nuevos, donde solo participan vehículos que están en la etapa de diseño y validación del modelo. En general, para motivar el avance, un equipo no puede competir en esta categoría dos años seguidos, ya que luego debe pasar a niveles superiores. Sin embargo, hay excepciones para los equipos que también compiten en las categorías 2 o 1. En este nivel, solo se evalúan las pruebas de diseño, presentación y costos.
- **Nivel 2:** Esta categoría está dirigida a equipos que ya han superado las etapas básicas de diseño y han logrado construir un vehículo completo. El requisito mínimo para entrar es tener un chasis completo. Similar a la categoría 3, los equipos que compitan en esta categoría por un año deben avanzar a la primera categoría el siguiente año si desean seguir participando. Aquí también solo se evalúan las pruebas de diseño, presentación y costos.
- **Nivel 1:** En esta categoría compiten monoplazas completamente construidos y que pueden moverse. Es la más importante de todas, y un coche solo puede competir en ella durante los 12 meses posteriores a su primera competición. Esta regla anima a los equipos a mejorar y construir nuevos vehículos constantemente. Se permite reutilizar componentes de coches anteriores, excepto el chasis.

Además, dentro de esta categoría están las "series 200", donde pueden participar vehículos con hasta 2 años de antigüedad.

La incorporación de una categoría para EV en el reglamento de la Formula SAE comenzó en 2014, con el objetivo de fomentar el desarrollo de automóviles completamente eléctricos dentro de este marco competitivo. Estas regulaciones se fundamentan en las normas para EV previamente establecidas por competiciones como Formula Student y Formula Student Germany, además de integrar aspectos específicos de las reglas de Formula Hybrid [19].

Para 2025, el reglamento de la Fórmula SAE incluye importantes limitaciones para los EV con el fin de asegurar la seguridad y un desempeño óptimo durante la competencia. Una de las principales restricciones es el uso exclusivo de motores eléctricos, sin imponer un límite en la cantidad de motores que pueden instalarse, siempre que estos cumplan con las especificaciones establecidas [20].

2.2.3 Dinámica vehículo tipo Formula Student

La dinámica vehicular es un aspecto crucial en el diseño de un monoplaza para la competencia Formula Student, ya que permite maximizar su rendimiento en carrera. Este concepto incluye elementos fundamentales como la distribución del peso, la interacción con el flujo aerodinámico y la estabilidad del vehículo. A través de herramientas avanzadas, como la simulación basada en la dinámica computacional de fluidos, se facilita la optimización de la geometría del chasis, logrando un equilibrio adecuado entre los ejes delantero y trasero, lo que resulta en una mejor maniobrabilidad y una reducción de la resistencia aerodinámica [21].

2.2.4 Aerodinámica vehículo tipo Formula Student

El diseño aerodinámico en los monoplazas Formula Student permite una innovación casi ilimitada al no estar sujeto a restricciones en perfiles o dimensiones, enfocándose en circuitos con curvas cerradas donde se prioriza la aceleración sobre la velocidad máxima, que alcanza aproximadamente 120 km/h, con una resistencia aerodinámica que impacta poco debido a las velocidades bajas y alta potencia, siendo más relevante incrementar la carga aerodinámica para mejorar tiempos de vuelta, mientras los dispositivos deben responder eficientemente a factores como viento cruzado y ángulos de guiñada, participando en disciplinas dinámicas como Aceleración, Autocross, Resistencia y Skid-Pad [22].

Figura 1.

Dinámica de Fluidos Computacional



Tomado de: Symula [23].

En la Figura 1 se destaca cómo la aerodinámica desempeña un papel crucial en los vehículos Formula Student, ya que la carga generada por los alerones delanteros y traseros mejora la tracción, permitiendo al monoplaza tomar curvas cerradas a mayor velocidad y reducir los tiempos de vuelta, optimizando así su rendimiento en circuitos donde la maniobrabilidad y la aceleración son fundamentales; para ello, se emplean perfiles aerodinámicos como el Selig 1223, conocidos por su alta sustentación y baja resistencia,

mientras que los alerones traseros generan una mayor carga aerodinámica y los delanteros equilibran el momento producido, asegurando la estabilidad del vehículo, un proceso respaldado por simulaciones computacionales que ajustan parámetros como la longitud de la cuerda y la envergadura de las alas, logrando un equilibrio entre rendimiento y costos de fabricación, además de cumplir con normativas de seguridad y utilizar materiales como fibra de carbono para maximizar la eficiencia estructural y minimizar el peso [24].

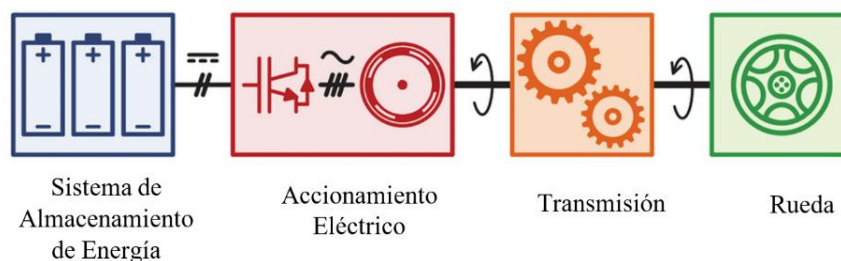
2.3 Principios básicos

2.3.1 Sistema de propulsión eléctrica

La propulsión mediante motores eléctricos se basa en un conjunto de componentes que generan y transmiten la fuerza necesaria para mover el vehículo. Estos motores reciben energía de baterías recargables de alto rendimiento, como las de iones de litio. A diferencia de los sistemas de propulsión que dependen de combustibles fósiles, el Sistema de Propulsión Eléctrica (EPS) destaca por su eficiencia energética, su menor impacto ambiental y su capacidad para proporcionar una aceleración instantánea gracias a la entrega directa de torque por parte de los motores eléctricos [25].

Figura 2.

Los componentes principales del EPS



Tomado de: Porru, Italia, (2016), [26].

La Figura 2 destaca los componentes principales de un EPS, los cuales deben ser seleccionados para cumplir con los requisitos específicos del vehículo, como la aceleración máxima, la velocidad y la resistencia [26].

2.3.2 Sistema de almacenamiento de energía

El Sistema de Almacenamiento de Energía, conocido como ESS (Energy Storage System), es un componente crucial en los EV y otros sistemas que utilizan energía eléctrica. Su función principal es almacenar energía eléctrica y liberarla según sea necesario para alimentar el motor eléctrico durante la operación del vehículo. Además, el ESS es responsable de capturar y almacenar la energía generada a través de procesos como el frenado regenerativo, lo que optimiza la eficiencia energética del sistema [27].

2.4 Baterías

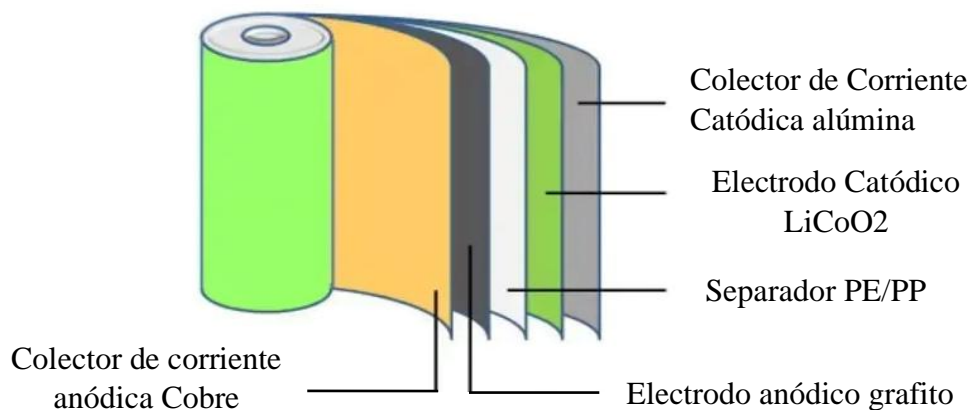
La batería en un EV convierte la energía química en energía eléctrica durante la carga y viceversa durante la descarga, estando compuesta por celdas electroquímicas que almacenan o liberan energía de forma individual o combinada, según su conexión [28].

2.4.1 Baterías de Ion de Litio

La batería recargable de Iones de Litio (Li-ion) es un dispositivo de almacenamiento de energía compuesto por celdas que, como se muestra en la Figura 3, permiten el movimiento de los iones de litio desde el ánodo hacia el cátodo a través de un electrolito durante el proceso de descarga, y en sentido inverso durante la recarga. Entre sus principales ventajas destacan su alto voltaje por celda, la elevada densidad de energía y la ausencia de efecto memoria. El material de cátodo más utilizado en este tipo de baterías es el óxido de litio y cobalto [29].

Figura 3.

Composición de Batería de Iones de Litio



Tomado de: Electricity Magnetism, Reino Unido, (2023), [30].

2.4.2 Baterías de Polímero de Litio

La batería de Polímero de Litio (LiPo), emplea óxido de cobalto y litio como electrodo positivo y un tipo especial de carbono altamente cristalizado como electrodo negativo, a diferencia de las baterías de iones de litio convencionales, las LiPo usan un separador de polímero entre el ánodo y el cátodo, siendo uno de los elementos más ligeros y con el mayor potencial electroquímico gracias a su gran capacidad energética, peso ligero y alta capacidad de corriente, las baterías LiPo son ideales para los EV [31].

2.4.3 Batería de Níquel-Cadmio

En la Figura 4 se muestra un conjunto de baterías de Níquel-Cadmio, conocidas por su distintivo diseño compacto y sellado, características que les otorgan una notable resistencia al calor extremo y una mayor ligereza en comparación con otras tecnologías de baterías. Estas baterías utilizan un electrolito de Hidróxido de Potasio, que no participa directamente en las reacciones químicas, permitiendo una menor tasa de autodescarga y contribuyendo a una estabilidad operativa sostenida. Además, la incorporación de placas de acero inoxidable, visible en el diseño general, asegura una resistencia interna constante

a lo largo de su vida útil, reduciendo significativamente el riesgo de corrosión y degradación de los materiales, lo que prolonga su desempeño eficiente [32].

Figura 4.

Batería de níquel-cadmio



Tomado de: Electrodaddy, España, (2021), [33].

2.4.4 Baterías de litio-hierro-fosfato

Las baterías de Litio-Hierro-Fosfato (LFP) emplean fosfato de hierro como componente principal en su cátodo, mientras que su ánodo está formado principalmente por cristales de carbono con diminutas partículas de litio de esta manera durante la descarga, estas partículas de litio migran desde el ánodo hacia el cátodo, generando así corriente eléctrica de este modo al recargar la batería, se invierte este proceso, y las partículas de litio retornan al ánodo [34].

2.4.5 Batería de óxido de litio y cobalto

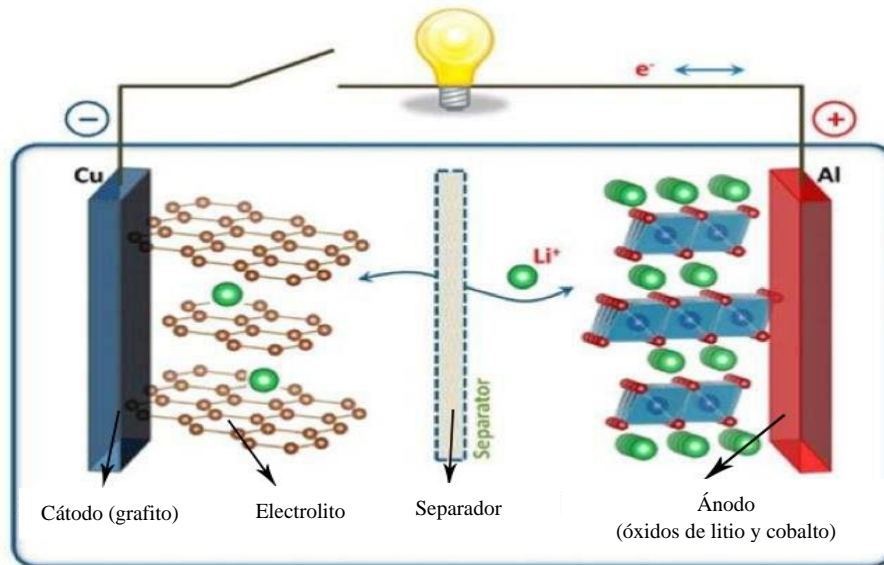
La batería de Litio con Óxido de Cobalto (LiCoO) tiene un cátodo compuesto por óxido de cobalto en una estructura de capas y un ánodo de carbono-grafito. Durante el proceso de descarga, los iones de litio se desplazan desde el ánodo hacia el cátodo, mientras que, en la fase de carga el movimiento de los iones se invierte. El funcionamiento

de esta batería se ilustra en la Figura 5. No obstante, presenta algunas desventajas, como una vida útil reducida, baja estabilidad térmica y capacidades de carga limitadas. En este

contexto, el ánodo de grafito puede enfrentar problemas, como el recubrimiento de litio y el engrosamiento del ánodo, especialmente en cargas rápidas o a bajas temperaturas [35].

Figura 5.

Funcionamiento de una batería de Óxido de Litio y Cobalto



Tomado de: Large, Dongguan, (2018), [36].

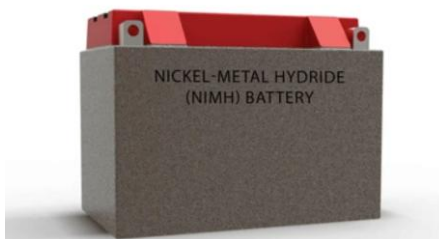
2.4.6 Batería de níquel-hidruro metálico

La batería de Hidruro Metálico de Níquel (NiMH), conocida por su resistencia a los ciclos de carga y descarga, está compuesta por tres elementos principales: un ánodo de aleación capaz de absorber y liberar hidrógeno, un cátodo de óxido de níquel donde tiene lugar la reacción de oxidación, y un electrolito basado en una solución acuosa de hidróxidos de potasio y sodio, que facilita el movimiento de iones entre el ánodo y el

cátodo [37]. La figura 6 muestra una batería de NiMH, la cual se destaca por su eficiencia y su alta tasa de autodescarga [38].

Figura 6.

Batería de níquel-hidruro metálico



Tomado de: Shutterstock, (2003), [38].

2.4.7. Batería plomo-ácido regulada por válvula

La batería regulada por Válvula de Plomo-Ácido (VRLA) es un tipo de batería sellada que no necesita mantenimiento. Utiliza una válvula que controla la presión interna para prevenir fugas de electrolito y convierte la energía química en eléctrica. Está formada por celdas, cada una con un voltaje aproximado de 2 voltios [39].

Tabla 1.

Comparación de componentes de la batería

Parámetro	Batería de iones de litio	Batería de NiMH	Batería de litio-ferrofosfato	Batería VRLA
Nombre de celda	NCR18650	HHR370AH	NX ACL9013	LC-PD1217PG
Ánodo	Litio intercalado (+ve)	Ni(OH) ₂	Electrodos de carbono grafítico con respaldo metálico	Plomo
Cátodo	Grafito (-ve)	Hidrato metálico	Fosfato de hierro y litio (LiFePO ₄)	Dióxido de plomo
Electrolito	LiPF ₆ (principalmente)	KOH	LiPF ₆ (principalmente)	Ácido sulfúrico

	compuestos de litio y sal)		compuestos de litio y sal)	
Densidad energética	676 Wh/L	140-300 Wh/L	325 Wh/L (1200 Wh/L)	80-90 Wh/L
Densidad de potencia	243 W/kg	250-1000 W/kg	200 W/kg	180 W/kg
Capacidad de celda	3250 mAh	3700 mAh	2300 mAh	17 Ah
Ciclos de vida	500-700 ciclos	500-1000 ciclos	1000 ciclos	350 ciclos
Tasa de descarga (C)	0.1C	0.2C	0.2C	0.3C

Tomado de: Vaideeswaran, India, (2021), [40] .

La Tabla 1 presenta un resumen de los parámetros clave de las baterías más utilizadas, lo que permite comparar sus características de manera efectiva, estas baterías se fabrican en celdas individuales, ya sean cilíndricas o rectangulares, y los fabricantes proporcionan datos específicos de cada celda, incluyendo perfiles de carga y descarga [40].

2.5 Motores eléctricos

2.5.1 Motor de imanes permanentes

En la Figura 7 se observan dos diseños de motores de Imanes Permanentes (PM), los cuales emplean imanes en el rotor para generar un campo magnético constante, eliminando así la necesidad de corriente eléctrica para este propósito. Estas máquinas eléctricas, como se muestra en la figura, destacan por su alta eficiencia y su diseño compacto, lo que les permite ofrecer un torque elevado en un tamaño reducido. La integración de imanes permanentes no solo simplifica el diseño, sino que también mejora significativamente el rendimiento energético, haciéndolos ideales para aplicaciones que requieren un equilibrio entre potencia y eficiencia [41].

Figura 7.

Estructura de un motor de imanes permanentes



Tomado de: ENNENG, Beijing, (2020), [41].

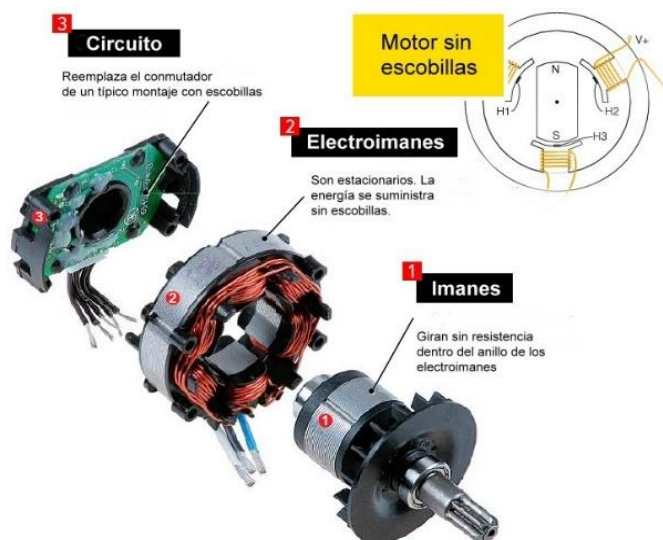
2.5.2 Motor de corriente alterna síncrono

El motor síncrono de corriente alterna es un equipo que funciona a una velocidad fija, la cual depende de la frecuencia de la corriente de la red eléctrica y del número de pares de polos del motor. A diferencia de los motores de inducción, el rotor de este motor se mueve en sincronía con el campo magnético giratorio del estator, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren una velocidad precisa [42].

2.5.3 Los motores sin escobillas (*Brushless*)

A continuación, en la Figura 8 se puede observar el motor sin escobillas, también conocido como motor Brushless, es un motor eléctrico que, en lugar de usar escobillas para cambiar la polaridad en el rotor, utiliza un Controlador Electrónico por sus siglas en inglés (ESC) para realizar la conmutación, aprovechando un colector de delgas o anillos rozantes para hacer girar el eje rotativo [43].

Figura 8.
Motor sin Escobillas



Tomado de: De Máquinas y Herramientas, (2014), [44].

2.6 Controlador

El controlador de motores eléctricos, conocido como el "cerebro" de los EV, transforma la energía de la batería en electricidad para operar el motor según las órdenes de quien lo opere, gestionando funciones como arranque, velocidad, dirección y potencia, e incorporando retroalimentación de energía, diagnóstico de fallos y protección para garantizar un funcionamiento seguro y confiable en condiciones variables [45].

La fiabilidad del controlador del motor se reduce de manera progresiva conforme aumenta el tiempo de operación del EV evidenciando un deterioro constante con el paso del tiempo y entre todos los módulos y componentes del controlador se identificó que el módulo de control es el que experimenta la degradación más rápida [46].

2.7 Gestión térmica

La gestión térmica en EV se refiere a la implementación de sistemas diseñados para mantener las temperaturas de las baterías y el compartimento de pasajeros dentro de rangos óptimos, asegurando un rendimiento eficiente, seguro y prolongado [47].

2.7.1 Sistema de recuperación de energía cinética (KERS)

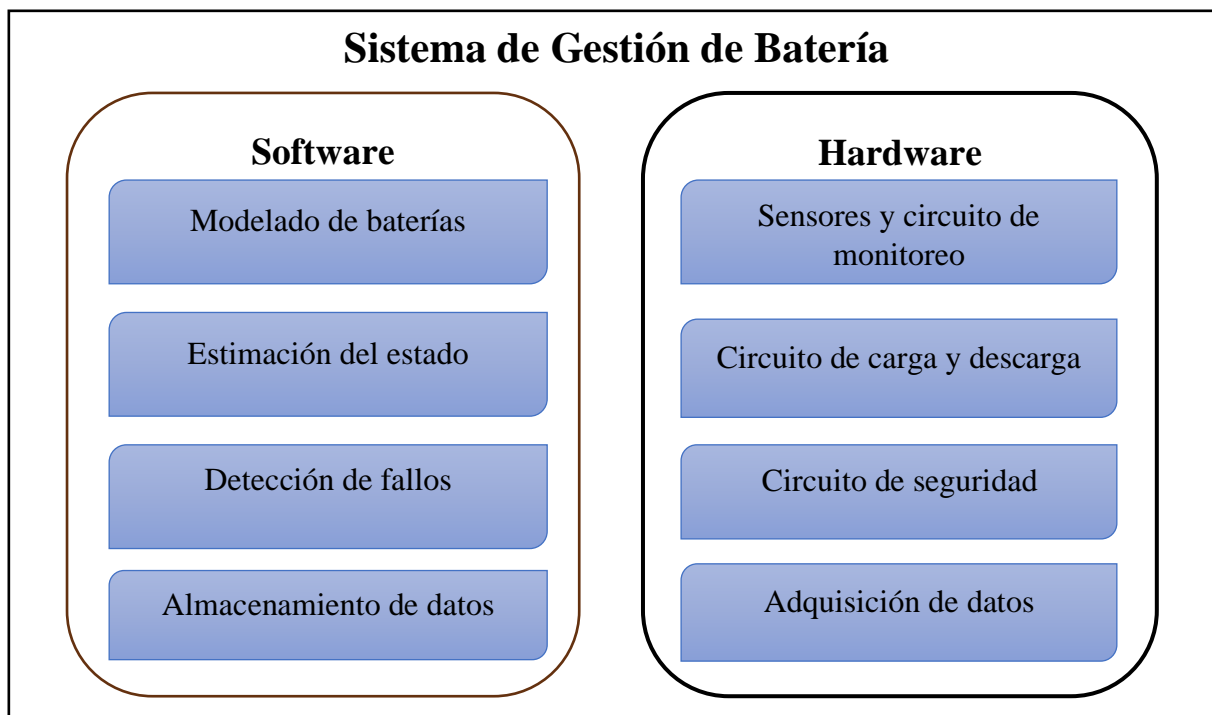
El KERS se basa en almacenar la energía cinética producida durante la frenada, transformándola en energía eléctrica que incrementa la potencia del motor y recarga la batería eléctrica, este sistema es un mecanismo de la industria automovilística que busca implementar el concepto de freno regenerativo al aprovechar la energía cinética perdida durante la frenada, convirtiéndola en energía eléctrica, mecánica o incluso cinética, la cual se almacena para su uso posterior, como en EV o híbridos, donde la energía generada alimenta las baterías para potenciar el motor en situaciones específicas como un sprint o en pruebas de resistencia [48].

2.7.2 Sistema de administración de batería

El Sistema de Administración de Baterías (BMS, por sus siglas en inglés) es un conjunto de componentes electrónicos diseñado para monitorear y gestionar el funcionamiento de baterías recargables. Su función principal es asegurar que las baterías operen dentro de parámetros seguros, prolongando su vida útil y optimizando su rendimiento. Esto se logra al supervisar aspectos como el voltaje total, los voltajes individuales de las celdas, la temperatura y la corriente de carga y descarga. Además, protege contra situaciones de sobrecarga, sobredescarga, sobrecorriente y temperaturas extremas, calculando el Estado de Carga (SoC) y el Estado de Salud (SoH) para proporcionar información sobre la capacidad y condición actual de la batería. También se encarga de mantener los niveles de carga equilibrados entre todas las celdas, lo que maximiza la capacidad total y extiende la durabilidad de la batería [49].

Figura 9.

Descripción general de los componentes de hardware y software del BMS



Tomado de: Ranjith, India, (2023) [50].

En la Figura 9 se observa que el SoC, el SoH, el Estado de Energía (SOE), el Estado de Potencia (SOP) y el Estado de Vida (SOL) son estimaciones clave dentro de las tecnologías de gestión de baterías, siendo el SoC y el SoH fundamentales para garantizar la seguridad y mejorar la fiabilidad, mientras que el BMS, un dispositivo de software y hardware, controla las baterías y optimiza su rendimiento al gestionar las operaciones del hardware, analizar datos de sensores para la toma de decisiones, realizar un procesamiento de datos en línea y un análisis inteligente que permiten detectar fallas y prevenir problemas, apoyándose en componentes de hardware como los sensores que miden parámetros esenciales como voltaje y corriente [50].

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación adopta un enfoque cuantitativo y aplicado. Este enfoque se justifica en su naturaleza, que es el desarrollo e implementación experimental de un sistema de propulsión eléctrica de alto rendimiento para un vehículo de competencia Formula Student. El estudio se fundamenta en el paradigma positivista, dado que la comprobación de la hipótesis y la validación del sistema se apoyan en la medición precisa de variables físicas y en la comprobación rigurosa de resultados mediante la ejecución de pruebas experimentales controladas en banco y en pista.

El presente estudio se enmarca como una investigación de desarrollo tecnológico con un enfoque experimental. Este enfoque se justifica en la necesidad de diseñar e implementar un sistema de propulsión eléctrico funcional, compuesto por dos motores eléctricos de 4000-5000 W cada uno, para posteriormente evaluar su desempeño. Dicha evaluación se realizará inicialmente en un banco de pruebas (dinamómetro) y, de forma subsecuente, en pista. Adicionalmente, el alcance incluye una fase descriptiva y comparativa, cuyo objetivo es analizar el rendimiento del nuevo sistema de propulsión en contraste con el sistema predecesor utilizado en el vehículo Formula Student de la Universidad Técnica del Norte.

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN MATERIALES, EQUIPOS Y SOFTWARE

3.2.1 Motor eléctrico

El motor seleccionado corresponde a un modelo Brushless de corriente continua (BLDC por sus siglas en inglés) de 72 V que cumple con los requerimientos de potencia y torque necesarios para el vehículo tipo Formula Student. Sus parámetros eléctricos y mecánicos se resumen en la Tabla 2, con el fin de establecer su compatibilidad con el sistema de control y almacenamiento de energía.

Tabla 2.

Especificaciones Técnicas del motor eléctrico

Parámetro	Especificación técnica
Tipo de motor	Motor eléctrico de corriente continua sin escobillas
Voltaje nominal	72 V
Potencia nominal	5000 W (5 kW)
Velocidad nominal	6800 – 7000 rpm
Par nominal	8.5 N·m
Corriente nominal	60 – 80 A
Refrigeración	Por aire, con carcasa y disipador de calor
Clase de aislamiento	F (hasta 155 °C / 311 °F)
Grado de impermeabilidad (IP)	IP54 (resistente al polvo y salpicaduras de agua)
Peso	5 kg

Figura 10.

Motor eléctrico de 5000W



3.2.2 Controlador

El módulo controlador actúa como inversor y unidad de control del motor BLDC, permitiendo el manejo preciso del par y la velocidad mediante PWM. Este dispositivo también incorpora protecciones térmicas y eléctricas, garantizando un funcionamiento seguro dentro del sistema de propulsión. La Tabla 3 resume sus especificaciones.

Tabla 3.

Especificaciones Técnicas del controlador

Parámetro	Especificación técnica
Tensión nominal	48-72 V
Potencia nominal	3 000-5 000 W
Corriente nominal de salida	100 A
Corriente de protección de fase	300 A
Peso neto	2.5 kg
Grado de impermeabilidad (IP)	IP67 (totalmente resistente al polvo e inmersión temporal en agua)

Figura 11.

Controlador para el motor eléctrico de 5000W



3.2.3 Breaker

Para la protección del sistema eléctrico se ha seleccionado el interruptor magnetotérmico ABB S201-C50. Este componente de la línea System pro M Compact es vital para proteger los circuitos del prototipo contra sobrecargas y cortocircuitos en las condiciones exigentes de la Formula Student. Su diseño modular permite una integración eficiente en el panel eléctrico, garantizando fiabilidad operativa en un rango térmico de - 25 °C a 55 °C, tal como se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4.

Especificaciones Técnicas del interruptor

Parámetro	Especificación técnica
Modelo	S201-C50 (1 Polo)
Corriente Nominal (I_n)	50 [A] - DC
Curva de Disparo	C
Poder de Corte (I_{cn})	6 kA
Tensión de Impulso (U_{imp})	4 kV
Sección de Cable	35 mm ²

Figura 12.

Interruptor ABB automático - DC



3.2.4 Bornera

Para el cableado del motor, se utiliza una placa de bornes K1M10 que permite organizar las fases de potencia de forma segura. Su diseño robusto y base aislante están pensados para resistir las vibraciones y el calor propios del prototipo, facilitando el mantenimiento y garantizando una conexión firme que evita riesgos eléctricos durante la operación del vehículo. Las características principales de este componente se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5.

Especificaciones Técnicas de la Bornera

Parámetro	Especificación técnica
Modelo	K1M10
Tipo	Bloque de terminales para motor
Fijación	Espárragos con tuercas y puentes metálicos
Uso principal	Interfaz de potencia y distribución de fases

Figura 13.

Placa Bornera K1M10



3.2.5 Batería de Ion de Litio

Las Para alimentar el motor eléctrico de 72 V y 5 kW se seleccionó un paquete de baterías de iones de litio tipo, configurado para entregar el voltaje y la corriente requeridos por el sistema de propulsión. A continuación, se detallan sus principales características técnicas y operativas en la Tabla 6.

Tabla 6.

Especificaciones de Baterías de Ion de Litio

Parámetro	Especificación
Tipo de batería	Iones de Litio (Lithium-ion)
Modelo	XP-20S-72V58Ah-EM
Configuración del pack	20S (20 celdas en serie)
Voltaje nominal	72 V
Voltaje máximo	84 V (20 × 4.2 V)
Voltaje mínimo de descarga	≈ 60 V (20 × 3.0 V)
Capacidad nominal	58 Ah
Energía nominal	4176 Wh (≈ 4.18 kWh)

Parámetro	Especificación
Peso neto	22 kg
Corriente de descarga continua	80 A
Corriente de descarga máxima	100 A
Grado de impermeabilidad (IP)	IP65 (totalmente resistente al polvo y a salpicaduras de agua)

Figura 14.

Baterías de Ion de Litio



3.2.6 Cargador

El cargador propuesto está adaptado al pack de baterías de 72 V–58 Ah, ofreciendo control de corriente y voltaje constante para una carga segura y estable que se describen en la Tabla 7.

Tabla 7.

Especificaciones Cargador para Baterías Ion de Litio

Parámetro	Especificación técnica
Tipo de batería compatible	Iones de Litio NMC – 20S (72 V nominal / 84 V máxima)
Tensión de salida nominal	84 V CC (voltaje de carga total)
Corriente de carga	10 A (estándar) / 20 A (rápido)
Voltaje de entrada AC	AC 110V (automático, 50/60 Hz)

Parámetro	Especificación técnica
Método de enfriamiento	Ventilador inteligente controlado por temperatura
Indicadores LED / Display	Estado de carga (CC, CV, completo, error)
Material del chasis	Aluminio anodizado con disipador interno
Grado de protección	IP54 (resistente al polvo y salpicaduras)
Temperatura de operación	-10 °C a +45 °C
Peso neto	2 kg

Figura 15.

Cargador para las baterías de Ion de Litio



3.2.7 Formula Student

El vehículo empleado como base para la implementación del sistema de propulsión eléctrica corresponde a un prototipo Formula Student, diseñado conforme a los lineamientos de la SAE. Este chasis proporciona una plataforma ligera y modular que facilita la integración del motor eléctrico, el sistema de transmisión, el paquete de baterías y los elementos de control electrónico, permitiendo evaluar el desempeño del sistema en condiciones reales de funcionamiento con las dimensiones que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8.

Dimensiones del Prototipo Formula Student

Parámetro	Especificación técnica
Ancho de vía delantero	1300 mm
Ancho de vía posterior	1450 mm
Distancia entre ejes	1530 mm

Parámetro	Especificación técnica
Centro de gravedad desde el eje neutro	60 mm
Masa total con conductor de 90 kg	368,5 kg
Distribución de masas del eje delantero	46,08 %
Distribución de masas del eje trasero	53,92%
Altura del centro de gravedad	260mm
Frenos	Sistema independiente para cada rueda
Suspensión	Amortiguador Xuri a Gas CG125/GY6-150
Dirección	Desmultiplicador de giro de volante

Figura 16.

Prototipo Formula Student



3.2.8 Registrador de Datos

Para la fase de recolección de datos, se seleccionó el registrador TSI GL-770 debido a su capacidad de trabajar simultáneamente con redes GPS y GLONASS, lo cual asegura una mayor precisión en las coordenadas obtenidas. Como se observa en la Tabla 9, el equipo permite almacenar hasta 250,000 puntos de registro, una característica fundamental para cubrir las largas jornadas de prueba sin pérdida de información.

Tabla 9.

Especificaciones Técnicas del Registrador de datos TSI GL-770

Parámetro	Especificación técnica
Tipo de equipo	Registrador GNSS (GPS + GLONASS)
Sistemas satelitales	GPS y GLONASS
Capacidad de memoria	Hasta 250 000 puntos de registro
Datos registrados	Latitud, longitud, altitud, velocidad, dirección, fecha y hora
Autonomía	Más de 35 horas de operación
Dimensiones	82 × 52 × 19 [mm]
Peso	80 g
Compatibilidad de software	Windows (TSI LogView)
Funciones adicionales	Botón POI para marcar puntos, modo vehículo, vibración/sonido

Figura 17.

Registrador de datos TSI GL-770



3.2.9 Dinamómetro

Para la validación de potencia, se utilizó un dinamómetro de chasis Vamag cuyas especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 10, seleccionado por su capacidad de soportar hasta 400 hp y 1500 Nm de torque. Estas prestaciones, superiores a las del prototipo, garantizaron un margen de seguridad óptimo durante los ensayos. El equipo

opera con rodillos de 240 mm que permiten alcanzar de forma controlada los 180 km/h, utilizando un sistema neumático de 6 bar para asegurar la estabilidad del vehículo y obtener datos precisos en cada prueba de desempeño.

Tabla 10.

Especificaciones Técnicas del Dinamómetro Vamag

Parámetro	Especificación técnica
Potencia máxima	400 hp
Torque máximo	1500 Nm
Velocidad máxima	180 km/h
Diámetro del rodillo	240 mm
Ancho del rodillo	660 mm
Presión de operación	6 bar

Figura 18.

Dinamómetro Vamag



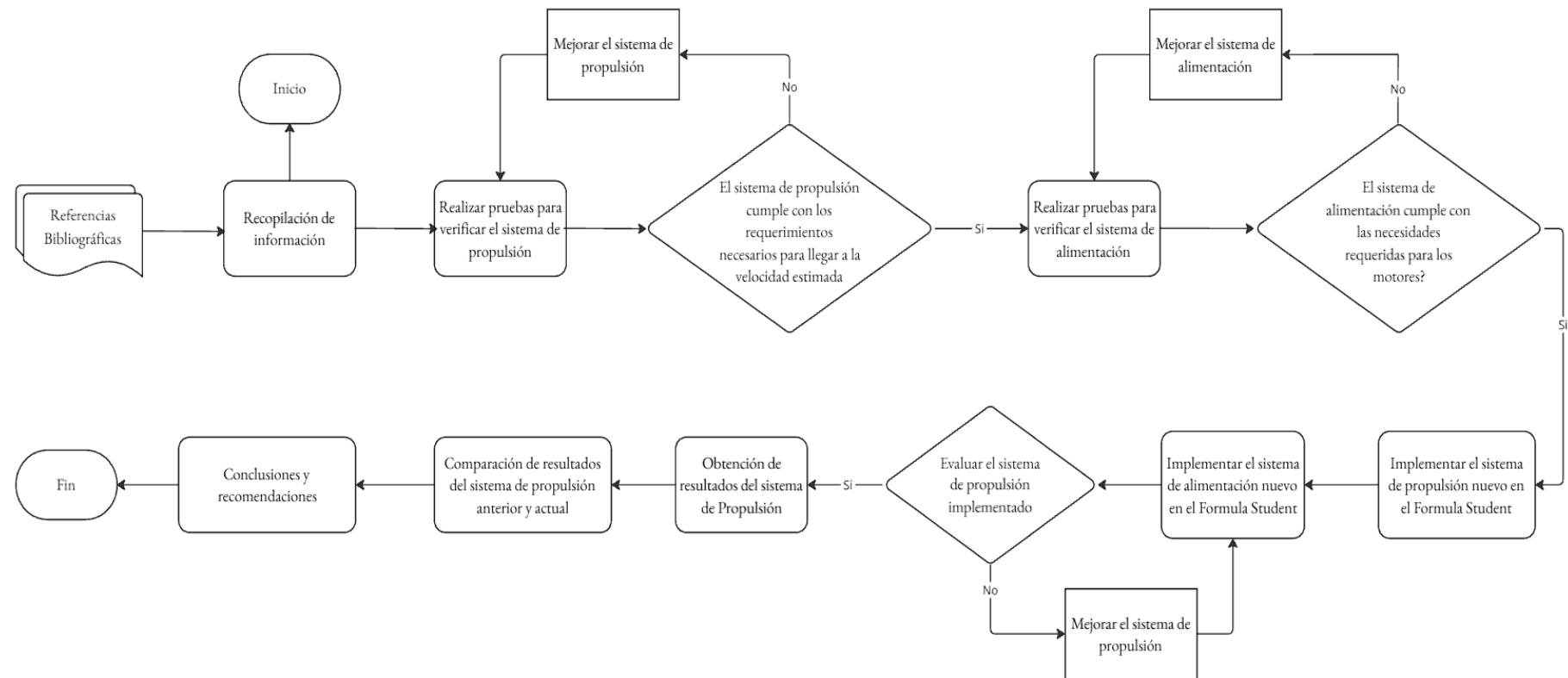
3.3 METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente proyecto se estructura en una secuencia de etapas que permiten cumplir con los objetivos planteados y garantizar la correcta implementación del sistema de propulsión eléctrica de alto rendimiento en el vehículo tipo Formula Student. Cada fase se desarrolló de manera sistemática, partiendo de la recopilación de información teórica hasta la validación experimental del sistema implementado.

En la Figura 19 se presenta el diagrama de flujo de la metodología, el cual ilustra de manera ordenada las actividades realizadas durante el desarrollo del proyecto, desde la recopilación bibliográfica y las pruebas del sistema de propulsión hasta la implementación y evaluación del nuevo sistema eléctrico

Figura 19.

Diagrama de flujo



3.3.1 Recopilación y análisis de información

En la primera etapa se realizó la recopilación de información técnica sobre sistemas de propulsión eléctrica aplicados a vehículos tipo Formula Student, mediante la revisión de fuentes bibliográficas, artículos académicos, manuales de fabricantes y el reglamento de la Formula SAE. Este análisis permitió definir los requerimientos de diseño en términos de potencia, torque y velocidad, así como identificar las limitaciones de eficiencia y rendimiento presentes en el sistema de propulsión actual del prototipo de la Universidad Técnica del Norte.

3.3.2 Pruebas del sistema de propulsión actual

En la segunda etapa se efectuaron pruebas experimentales al sistema de propulsión existente para determinar su desempeño real. Se midieron variables eléctricas y mecánicas, como corriente, voltaje, potencia, velocidad y par motor con el fin de evaluar su capacidad de cumplir los requerimientos del reglamento de la Formula SAE. Los resultados obtenidos sirvieron como referencia para establecer los parámetros de mejora del nuevo sistema de propulsión.

3.3.3 Dimensionamiento del nuevo sistema de propulsión

En la tercera etapa se diseñó y dimensionó el nuevo sistema de propulsión eléctrica, seleccionando los principales componentes: dos motores de 5000 W, controladores, baterías de litio y elementos de transmisión. Se efectuaron cálculos de potencia, torque y autonomía, junto con simulaciones eléctricas y mecánicas, para asegurar que el sistema cumpla con los requerimientos del vehículo tipo Formula Student.

3.3.3.1 Relación de Transmisión

Ecuación 1.

Relación de Transmisión

$$Rt = \frac{Z2}{Z1} \quad [1]$$

Donde:

Z2= Número de dientes de catalina (45)

Z1= Número de dientes piñón salida motor eléctrico (15)

Desarrollo:

$$Rt = \frac{45}{15}$$

$$Rt = 3$$

3.3.3.2 Selección de Motores

Para elegir los motores, el primer paso fue realizar un análisis de cuerpo libre, con el objetivo de determinar la fuerza que deben generar los motores para que el vehículo pueda arrancar desde el reposo y posteriormente alcanzar la velocidad deseada de 90 km/h.

Transformación de la velocidad de $[km/h]$ a $[m/s]$

$$90 [km/h] = 25 [m/s]$$

Cálculo para la selección de motores

Cálculo de la fuerza de resistencia aerodinámica (Fa)

Para encontrar la fuerza de resistencia aerodinámica, tomando en cuenta que se utilizará una velocidad estimada de 25 [m/s].

Ecuación 2.

Fuerza de Resistencia Aerodinámica

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_x \cdot k_f \cdot v^2 \quad [2]$$

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \cdot (0,901 \text{ kg/m}^3) \cdot (1,68 \text{ m}^2) \cdot (0,44) \cdot (0,28) \cdot (25 \text{ m/s})^2$$

$$F_{aer} = 58,27 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\mathbf{F_{aer} = 58,27 N}$$

Para realizar los siguientes cálculos tomamos el peso del Formula Student que es 343,5 kg incluido el piloto además contamos con la distribución de masas en el eje delantero con un valor de 46,08 %, por lo que podemos calcular la masa total que soportan las ruedas del eje delantero.

$$343,5 \text{ kg} * \frac{46,08}{100} = 158,284 \text{ [kg]}$$

Ya que sabemos el valor de la masa que soportan las ruedas delanteras cada rueda soporta una masa de 84,90 kg.

Fuerzas del eje Y en neumáticos

Ecuación 3.*Fuerza de la Normal*

$$N = mg \quad [3]$$
$$N = 84,90 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$
$$N = \mathbf{832,89 [N]}$$

Cálculo del Coeficiente de Fricción

Se elegirá un coeficiente de valor entre 0,8 a 0,9 porque las pruebas se realizarán en una superficie de hormigón seco.

Ecuación 4.*Fuerza de Fricción*

$$Fr = \mu N \quad [4]$$
$$Fr = 0,8 * 832,89 \text{ N}$$
$$Fr = \mathbf{666,31 [N]}$$

Resistencia a la Rodadura**Ecuación 5.***Resistencia a la Rodadura*

$$F_{rod} = m \cdot g \cdot \cos \theta \cdot frr \quad [5]$$
$$F_{rod} = (343,5 \text{ kg}) \cdot (9,81 \text{ m/s}^2) \cdot \cos (0,10) \cdot (0,030)$$
$$F_{rod} = 101,09 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$
$$F_{rod} = \mathbf{101,09 [N]}$$

Potencia Total Requerida

Ecuación 6.

Potencia Total

$$P_{total} = \frac{(F_{aer} + F_{rod} + F_{pend}) \cdot V}{n_{Transmisión}} \quad [6]$$

$$P_{total} = \frac{(F_{aer} + F_{rod}) \cdot V}{n_{Transmisión}}$$

$$P_{total} = \frac{(58,27N + 101,09N) \cdot (25 \text{ m/s})}{0,95}$$

$$P_{total} = 4193,68 \text{ W}$$

$$P_{total} = 4,19 \text{ [kW]}$$

3.3.3.3 Selección de Baterías

Después de seleccionar los motores, fue necesario escoger una o varias baterías que pudieran cumplir con dos requisitos principales: por un lado, proporcionar el voltaje de alimentación de 72V que necesita cada motor, y por otro, cumplir con la norma establecida por Fórmula SAE en cuanto a la autonomía del prototipo. Esto significa que el vehículo debe ser capaz de completar 22 vueltas en una pista de 1 km, es decir, contar con una autonomía superior a 22 km.

Durante el proceso de diseño electrónico del pack de baterías se consideraron dos parámetros fundamentales. El primero corresponde a los requerimientos del controlador electrónico instalado en el vehículo Formula Student, el cual opera con un voltaje nominal de 48 V y admite un máximo de 72 V. El segundo parámetro corresponde a la corriente nominal necesaria para garantizar el máximo rendimiento del motor, establecida en 80 A.

Con base en estos datos se procedió a realizar los cálculos correspondientes, como se muestra en las ecuaciones 7 y 8, con el objetivo de determinar el número de celdas de ion de litio necesarias para alcanzar las condiciones eléctricas requeridas por el sistema

de propulsión. Cada celda empleada posee un voltaje nominal de 3.6V y una corriente nominal de 6.7A. El cálculo mencionado se detalla a continuación:

Ecuación 7.*Voltaje*

$$V = ns * Vu \quad [7]$$

$$V = 20 * 3.6 [V]$$

$$V = 72 [V]$$

Donde:

V: Voltaje nominal del banco de baterías

ns: Número de celdas en serie

Vu: Voltaje nominal unitario por celda

Ecuación 8.*Corriente*

$$I = np * IC \quad [8]$$

$$I = 12 * 6.7 [A]$$

$$I = 80.4 [A]$$

Donde:

I: Corriente nominal del banco de baterías

np: Número de celdas en paralelo

IC: Corriente nominal unitario por celda

Energía Consumida por cada kilómetro recorrido

Ecuación 9.*Energía Consumida por kilómetro*

$$E_{km} = \frac{\text{Energía Utilizada (kWh)}}{\text{Distancia Recorrida (km)}} \quad [9]$$

$$E_{km} = \frac{(4,19 \text{ kW}) \cdot (0,275 \text{ h})}{22 \text{ km}} \cdot 100$$

$$E_{km} = 4,65 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right]$$

Autonomía Estimada**Ecuación 10.***Autonomía*

$$\text{Autonomía (km)} = \frac{\text{Capacidad de la batería (kW)}}{\text{Consumo Promedio} \left(\frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}} \right)} \quad [10]$$

$$\text{Autonomía (km)} = \frac{4,18 \text{ kW}}{4,65 \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}}$$

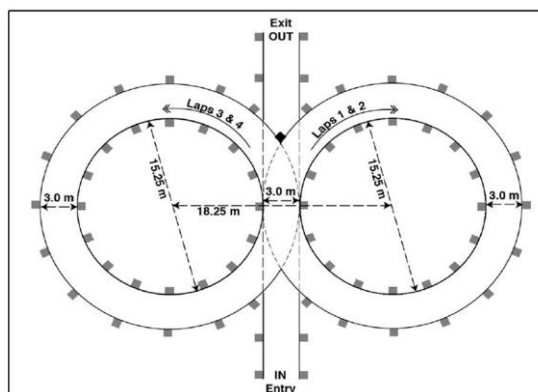
$$\text{Autonomía (km)} = 89,70 \text{ [km]} \approx 90 \text{ km}$$

3.3.4 Prueba para Verificar el Sistema de Suspensión**3.3.4.1 SkidPad**

En esta prueba se busca determinar el límite de adherencia del vehículo al tomar una curva de radio constante sobre una superficie asfaltada y lisa. El objetivo es evaluar el desempeño del Fórmula Student en el paso por curva. Para ello, se diseñó un circuito con forma de ocho, cuyas dimensiones se muestran en la Figura 20.

Figura 20.

Circuito de Skidpad



Durante la prueba, el vehículo ingresa al circuito por el punto central y gira hacia la derecha. Una vez que completa una vuelta, se inicia el cronometraje y se realizan dos vueltas en el círculo derecho y dos en el círculo izquierdo. El diseño del sistema de suspensión y dirección, junto con la correcta calibración de los amortiguadores y neumáticos, son factores clave para lograr una buena adherencia y obtener un mejor rendimiento.

La evaluación se basa en el tiempo total que tarda el vehículo en completar el recorrido. Es importante destacar que una correcta configuración de la dirección y la suspensión mejora la maniobrabilidad y el desempeño general del vehículo. En este circuito también se analiza el balanceo lateral, observando la respuesta del vehículo al tomar curvas a diferentes velocidades. Se espera que mantenga un nivel adecuado de inclinación lateral sin perder estabilidad ni control.

3.3.4.2 Prueba de Rebote Prolongado

En esta prueba se evaluará el comportamiento de los amortiguadores al aplicar una fuerza o peso que los comprima. Después de la compresión, el amortiguador debe regresar a su posición original; un rebote excesivo podría indicar desgaste o daño en el componente. Además, la suspensión no debe ser demasiado rígida ni demasiado suave, ya que esto afectaría la estabilidad del vehículo.

De acuerdo con las normas de diseño del sistema de suspensión, el recorrido mínimo de la rueda debe ser de 50 milímetros. Durante la prueba, se aplica una fuerza o peso en las cuatro zonas del vehículo donde se ubican los amortiguadores, con el fin de comprobar que se encuentren en buen estado y en condiciones óptimas para la competencia.

3.3.5 Prueba para Verificar el Sistema de Frenos

3.3.5.1 Distancia de Frenado

La distancia de frenado es el tramo que recorre el vehículo desde que se aplica el freno hasta que se detiene por completo. Para calcularla se requieren los siguientes datos:

a. Velocidad del Vehículo

Las velocidades del vehículo se registraron con el velocímetro ubicado en la parte superior del volante; dichas lecturas están en km/h, por lo que, para los cálculos, es necesario convertirlas a m/s.

b. Coeficiente de Adherencia de los Neumáticos

Para estimar un coeficiente de adherencia representativo se analizaron valores reportados en tesis previas y otros documentos; con esa revisión se adoptó $U_r = 0,54$ [51]

c. Gravedad

La gravedad considerada es el efecto resultante de la atracción terrestre y la aceleración centrífuga por la rotación del planeta; su valor medio utilizado en los cálculos es $g = 9,80 \text{ m/s}^2$ [52].

d. Inclinación de la Calzada

En este caso se desprestigió (se anuló) la inclinación de la calzada porque la prueba se realizó sobre una superficie plana.

Con esos datos se reemplazó en la fórmula correspondiente y se procedió a resolverla de la siguiente manera:

Ecuación 11.*Distancia de Frenado*

$$D_f = \frac{V^2}{2 * g * U_r} \quad (11)$$

Donde:

D_f = Distancia de frenado

V^2 = Velocidad al cuadrado

g = Gravedad

U_r = Coeficiente de adherencia de los neumáticos

Al resolver la fórmula se obtuvieron los valores teóricos de la distancia de frenado. Se llevaron a cabo un total de cinco pruebas con el propósito de calcular un valor promedio y analizar los resultados obtenidos. En la Tabla 12 se presentan los valores teóricos de las pruebas.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos con las modificaciones en el sistema de propulsión, se basan en las pruebas realizadas conforme a los lineamientos y requerimientos establecidos por el reglamento de la Formula Student, permitiendo evaluar el desempeño del sistema en términos de potencia, eficiencia, integración y comportamiento dinámico, a través del análisis de tablas y datos experimentales, estableciendo comparaciones.

4.1 Resultados Prueba Skidpad

La prueba de Skidpad se realizó con el objetivo de evaluar el comportamiento dinámico del vehículo en curvas de radio constante, durante esta prueba se registraron los tiempos obtenidos en cada recorrido, los cuales permiten valorar de manera objetiva el desempeño del vehículo.

Tabla 11.

Resultados – Prueba Skidpad

Prueba N°	Tiempo total (s)	Porcentaje (%)
1	31.86 s	95.13 %
2	30.31 s	100 %
3	30.47 s	99.47 %
4	31.82 s	95.25 %
5	31.25 s	96.99 %
PROMEDIO	31.14 s	97.33 %

Como se observa en la Tabla 11, los tiempos de la prueba de Skidpad presentan una variación mínima entre ensayos. Esto indica que el vehículo tiene un comportamiento

dinámico consistente y predecible en las curvas. Además, a pesar del incremento en la masa total del prototipo, la integración de los motores eléctricos de 5000 W permitió compensar este peso extra y mantener una capacidad de aceleración competitiva frente a las pruebas anteriores.

4.2 Resultados Prueba de Frenado

La prueba de frenado se realizó con el objetivo de evaluar la capacidad del sistema de frenos del vehículo para detenerse de manera eficiente y controlada desde una velocidad establecida, conforme a los criterios de seguridad y desempeño de la Formula Student. Durante esta prueba se consideraron tanto los valores teóricos como los valores reales de distancia de frenado, permitiendo analizar el comportamiento del vehículo bajo condiciones reales de operación.

Tabla 12.

Resultados – Distancia de Frenado

Prueba N°	Velocidad máxima (km/h)	Df teórica (m)	Df real (m)	Porcentaje (%)
1	36 km/h	9.44. m	8.70 m	66.09 %
2	35 km/h	8.92 m	7.25 m	79.31 %
3	36 km/h	9.44 m	9.15 m	62.84 %
4	35 km/h	8.92 m	6.90 m	83.33 %
5	34 km/h	8.41 m	5.75 m	100 %
PROMEDIO	35.2 km/h	9.03 m	7.55 m	76.15 %

Los resultados promediados en la Tabla 12 muestran que, desde una velocidad de 35.2 km/h, la distancia teórica de frenado estimada era de 9.03 m. Sin embargo, el desempeño en pista superó las expectativas: la distancia real promedio fue de apenas 7.55 m. Esta mejora respecto al cálculo teórico demuestra un funcionamiento sobresaliente del sistema de frenos y una óptima interacción de agarre entre los neumáticos y la superficie.

4.3 Resultados Pruebas en el Dinamómetro

Para evaluar el desempeño del sistema de propulsión, se realizaron pruebas en dinamómetro que permitieron medir de forma controlada la potencia, el par motor y la velocidad máxima del vehículo. Este ensayo es fundamental para validar el correcto funcionamiento de los motores eléctricos y analizar su respuesta frente a distintos regímenes de operación.

Tabla 13.

Resultados – Dinamómetro

N° de Ensayo	Velocidad Punta (km/h)	Potencia Máxima (hp)	RPM Máxima (rpm)	Par Máximo (Nm)	Porcentaje (%)
1	98 <i>km/h</i>	19.5 hp	7631 rpm	26.0 Nm	98.08 %
2	98 <i>km/h</i>	19.3 hp	7650 rpm	27.0 Nm	98.32 %
3	100 <i>km/h</i>	19.5 hp	7780 rpm	25.0 Nm	100 %
4	98 <i>km/h</i>	19.3 hp	7680 rpm	25.0 Nm	98.71 %
5	98 <i>km/h</i>	19.3 hp	7670 rpm	25.0 Nm	98.58%
PROMEDIO	98.4 <i>km/h</i>	19.38 hp	7682 rpm	25.6 Nm	98.74 %

Como se detalla en la Tabla 13, la configuración actual del prototipo alcanzó una velocidad punta promedio de 98.4 km/h. Además, el sistema registró una potencia máxima de 19.38 hp a un régimen de 7682 rpm, junto con un par máximo de 25.6 Nm. Estos valores evidencian un incremento notable en el rendimiento en comparación con las pruebas previas, lo que demuestra una excelente integración de los motores eléctricos y una gestión eficiente de la potencia en todo el rango operativo.

4.4 Resultados Prueba Carga y Descarga

La prueba de carga y descarga de la batería se realizó con el objetivo de evaluar el comportamiento energético del sistema de almacenamiento del vehículo bajo

condiciones reales de operación. Esta prueba permitió analizar la autonomía, la velocidad alcanzada y la variación del voltaje durante el uso continuo del sistema de propulsión eléctrica, considerando únicamente la configuración actual del vehículo, ya que no se dispone de datos experimentales correspondientes a la configuración anterior.

Tabla 14.

Resultados – Prueba Carga y Descarga

N° de Ensayo	Distancia Recorrida (km)	Duración recorrido (s)	Velocidad máxima (km/h)	Voltaje de Descarga Batería (V)	Porcentaje (%)
1	110 km	4:01:00 s	97.40 km/h	58 V / 84 V	100 %
2	107.6 km	2:55:75 s	102.06 km/h	60V /84 V	97.81 %
3	80.8 km	2:27:14 s	118.86 km/h	64 V / 84 V	73.45 %
4	73.9 km	2:12:10 s	105.32 km/h	64 V / 84 V	67.18 %
5	89.59 km	3:12:10 s	90.69 km/h	62 V / 84 V	81.44 %
PROMEDIO	92.37 km	2:57:53 s	102.86 km/h	61.6 V/84 V	83.97 %

Los datos de la Tabla 14 demuestran que el paquete de baterías mantiene un comportamiento estable en trayectos prolongados. En promedio, el vehículo logró una autonomía de 92.37 km y alcanzó picos de velocidad de 102.86 km/h. Durante estos recorridos, el voltaje descendió de forma controlada desde su tope de 84 V hasta una media de 61.6 V. Estas cifras confirman una gestión energética sumamente eficiente, garantizando que las baterías suministran la potencia necesaria sin comprometer el desempeño ni la seguridad del vehículo.

4.5 Resultados Prueba Resistencia de 22 km

En la prueba de resistencia realizada en la pista de Yahuarcocha, se evaluó el desempeño del vehículo a lo largo de un recorrido de aproximadamente 22 km. Los resultados muestran que el mejor rendimiento se obtuvo en el ensayo 4, al registrar el menor tiempo, mientras que los demás ensayos presentan ligeras variaciones que reflejan

diferencias en la eficiencia y condiciones de conducción. En general, el vehículo mantiene un comportamiento estable, aunque con oportunidades de mejora en la consistencia de su desempeño.

Tabla 15.

Resultados – Prueba Resistencia de 22 km

N° de Ensayo	Distancia Recorrida (km)	Duración del recorrido (s)	Velocidad máxima (km/h)	Porcentaje (%)
1	22.05 km	00:20:49 s	103 <i>km/h</i>	85.16 %
2	22.01 km	00:19:28 s	100 <i>km/h</i>	90.51 %
3	22.51 km	00:18:45 s	96 <i>km/h</i>	94.58 %
4	22.04 km	00:17:45 s	105 <i>km/h</i>	100 %
5	22.00 km	00:19:36 s	94 <i>km/h</i>	90.13 %
PROMEDIO	22.12 km	00:19:16 s	99.6 <i>km/h</i>	91.08 %

La Tabla 15 muestra que las distancias recorridas se mantienen cercanas a los 22 km en todos los ensayos, mientras que los tiempos varían entre 17:45 s y 20:49 s minutos. El mejor desempeño se registra en el ensayo 4, con un tiempo de 17:45 s, equivalente al 100%, seguido del ensayo 3 con 18:45 s que equivale al 94.67%. En cuanto a la velocidad máxima, los valores oscilan entre 94 km/h y 105 km/h, con un promedio general de 99.6 km/h, mientras que el tiempo medio de recorrido es de 19:16 s, equivalente aproximadamente al 92.13% de eficiencia respecto al mejor resultado.

4.6 Resultados Prueba de Aceleración

En la prueba de aceleración, los resultados evidencian que el vehículo presenta un desempeño sólido en distancias cortas, alcanzando su mejor tiempo en el ensayo 3 con 9.52 s. A partir de este valor, se observa que los demás intentos mantienen tiempos

cercanos, lo que indica una respuesta consistente del sistema de aceleración. Sin embargo, las ligeras variaciones registradas sugieren que factores como la tracción o la entrega de potencia influyen en el rendimiento final, dejando ver que aún existe un pequeño margen de mejora en la optimización del arranque.

Tabla 16.

Resultados – Prueba de Aceleración

N° de Ensayo	Distancia Recorrida (m)	Duración del recorrido (s)	Porcentaje (%)
1	75 m	09.97 s	95.49 %
2	75 m	09.70 s	98.14 %
3	75 m	09.52 s	100 %
4	75 m	10.05 s	94.72 %
5	75 m	10.13 s	93.98 %
PROMEDIO	75 m	09.87 s	96.45 %

La Tabla 16 muestra que todos los ensayos se realizaron sobre una distancia constante de 75 m, con tiempos que oscilan entre 9.52 s y 10.13 s. El mejor resultado corresponde al ensayo 3 que equivale al 100%, seguido por el ensayo 2 con 9.70 s que corresponde al 98.14%. El promedio general es de 9.87 s, equivalente al 96.45%, lo que confirma que el vehículo mantiene un comportamiento relativamente estable, aunque con pequeñas variaciones que afectan su desempeño óptimo.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados presentado en este capítulo tiene como finalidad interpretar el desempeño del sistema de propulsión eléctrica que se implementó en el vehículo tipo Formula Student, a partir de los datos obtenidos en las pruebas experimentales realizadas. Mediante la evaluación de los resultados registrados en pruebas dinámicas, de frenado, dinamómetro y gestión energética, se analizan las mejoras alcanzadas, permitiendo validar el comportamiento y la efectividad del sistema bajo condiciones reales de operación.

Con el fin de comparar el desempeño obtenido en las pruebas anteriores con los resultados de las pruebas actuales, se empleó la ecuación de porcentaje de cambio, la cual permite determinar la variación existente entre dos valores promedio. Para este cálculo se tomó como referencia el promedio de los resultados de las pruebas anteriores y se lo comparó con el promedio obtenido en las pruebas más recientes.

Ecuación 12.

Porcentaje de Cambio

$$\% \text{ Cambio} = \frac{V_f - V_o}{V_o} * 100 \quad (12)$$

Donde:

%Cambio: Variación Porcentual

V_f: Valor Final

V_o: Valor Inicial

5.1 Análisis Prueba Skidpad

En la Tabla 17 se presenta un resumen comparativo entre los promedios obtenidos en las pruebas anteriores y los registrados en las pruebas actuales. Como se puede observar, el tiempo promedio para completar la prueba se redujo de 34,67 s a 31,14 s, lo que representa una disminución aproximada del 10,18 %. Esta variación indica una mejora en el desempeño del vehículo durante la prueba, ya que logró completar el recorrido en un menor tiempo.

Tabla 17.

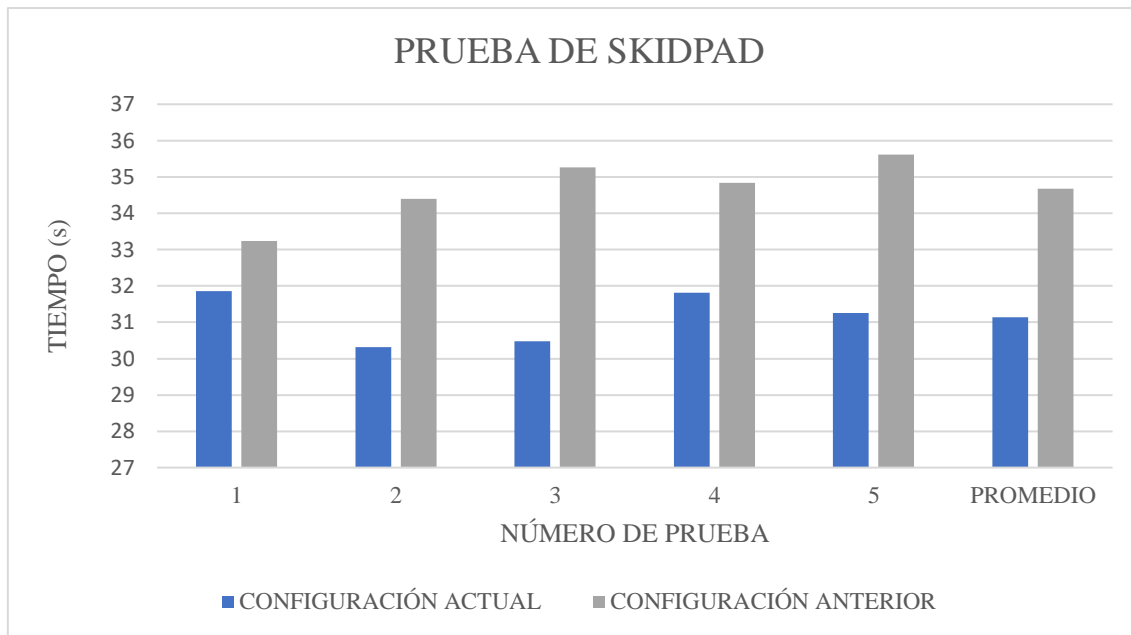
Comparación – Prueba Skidpad

Parámetro	Promedio anterior	Promedio Actual	Diferencia
Tiempo Promedio	34.67 [s]	31.14 [s]	10.18 %
Porcentaje Promedio	95.87 %	97.33 %	1.52 %

Al contrastar los resultados de la prueba de Skidpad entre ambas configuraciones, se evidencia una mejora sustancial en el desempeño dinámico del vehículo. Con las modificaciones implementadas en el sistema de propulsión, el tiempo promedio descendió de 34.37 s a 31.14 s. Esta reducción de 3.23 segundos confirma un incremento directo en la capacidad de adherencia lateral y una respuesta dinámica superior del nuevo conjunto como se muestra en la Figura 21.

Figura 21.

Comparación de tiempos en la prueba de Skidpad



5.2 Análisis Prueba de Frenado

En la Tabla 18 se presenta una comparación entre los valores promedio obtenidos en las pruebas realizadas con la configuración antigua y aquellos registrados con la configuración actual del vehículo. A partir de estos resultados se observa que la velocidad promedio de las pruebas aumentó de 24,6 km/h a 35,2 km/h, lo que representa un incremento aproximado del 43,08 %. De igual forma, la distancia promedio de frenado pasó de 6,05 m a 7,55 m, evidenciando un aumento del 24,79 %, lo cual se relaciona principalmente con la mayor velocidad alcanzada durante las pruebas actuales. Por otro lado, el porcentaje promedio de desempeño disminuyó de 93,98 % a 76,15 %, reflejando que, bajo las nuevas condiciones de operación, el sistema de frenado requiere una mayor distancia para detener completamente el vehículo.

Tabla 18.

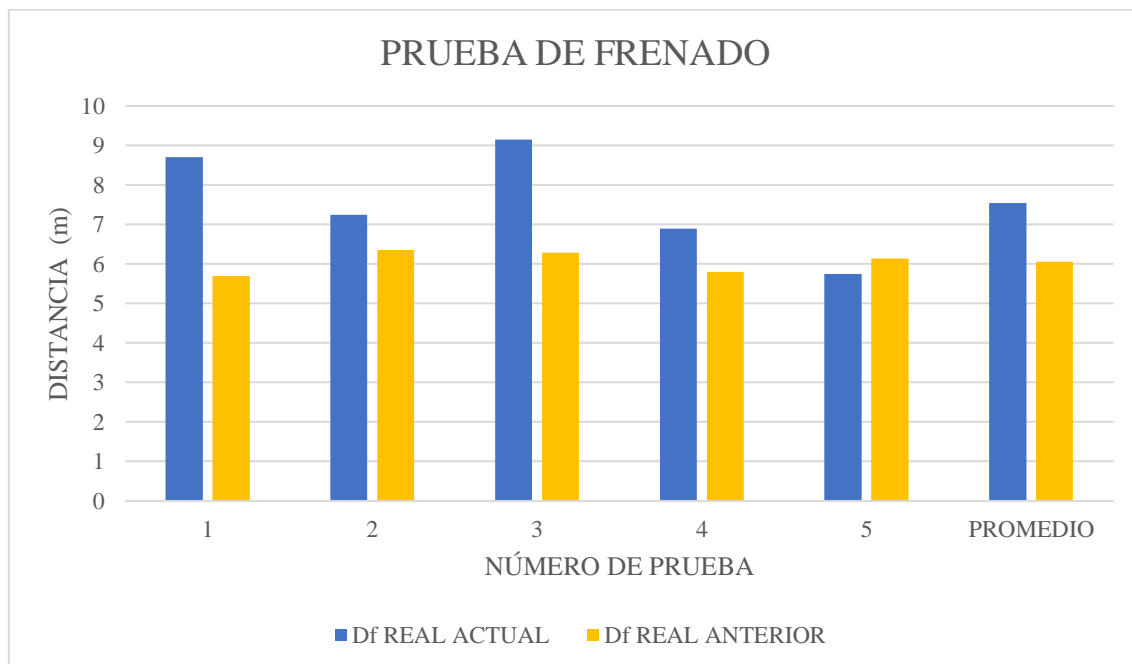
Comparación – Prueba de Frenado

Parámetro	Promedio Anterior	Promedio Actual	Diferencia
Velocidad Promedio	24.6 km/h	35.2 km/h	43.08 %
Distancia de Frenado Real	6.05 m	7.55 m	24.79 %
Porcentaje Promedio	93.98 %	76.15 %	- 18.97 %

La comparativa detallada por ensayo se presenta en la Figura 22. La tendencia gráfica confirma que la nueva configuración supera el rendimiento en la mayoría de los intentos, requiriendo menos metros para detener el vehículo por completo a pesar del aumento de masa y velocidad. La uniformidad de los resultados refleja un sistema de frenos altamente fiable y bien equilibrado para las exigencias de la Formula Student.

Figura 22.

Comparación de Prueba de Frenado



5.3 Análisis Pruebas de Dinamómetro

En la tabla 19 se presenta una comparación entre los valores promedio obtenidos con la configuración anterior del vehículo y los registrados con la configuración actual del sistema de propulsión. A partir de los resultados se observa un incremento significativo en los parámetros de desempeño del vehículo, destacándose el aumento de la velocidad punta, que pasó de 30.1 km/h a 98.4 km/h, así como el incremento de la potencia y el par desarrollado por el sistema de propulsión. De igual manera, el régimen máximo del motor aumentó de 4162 rpm a 7682 rpm, evidenciando una mayor capacidad operativa del sistema. Por otro lado, el porcentaje promedio de desempeño se mantuvo prácticamente constante, presentando una variación mínima de -0.11% , lo que indica que el comportamiento general del sistema se mantiene estable a pesar del incremento considerable en las prestaciones del vehículo.

Tabla 19.

Comparación – Prueba de Dinamómetro

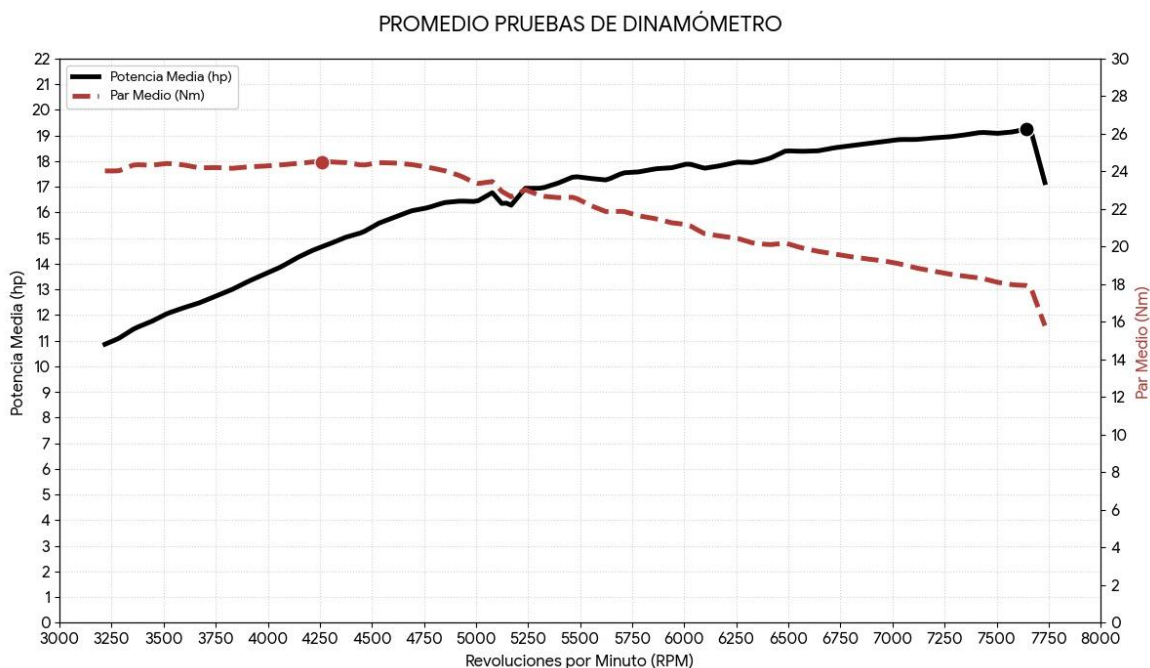
Parámetro	Promedio Anterior	Promedio Actual	Diferencia
Velocidad Punta Promedio	30.1 km/h	98.4 km/h	226.9 %
Potencia Promedio	2.64 hp	19.38 hp	634.09 %
RPM Promedio	3200 rpm	7682 rpm	140 %
Par Promedio	4.84 Nm	25.6 Nm	428.92 %
Porcentaje Promedio	98.85%	98.74 %	- 0.11 %

En la Figura 23 se observa con satisfacción que la curva media nos entrega con total nobleza 19,38 hp justo cuando el piloto más lo necesita, a las 7.682 RPM. Esta consistencia, que roza el 99% de fidelidad respecto a nuestras mejores marcas, nos da la

confianza de que el motor responderá con la misma fuerza desde la primera hasta la última vuelta de resistencia. No solo buscamos potencia bruta, sino un aliado para el piloto: un par motor de 25,6 Nm que se siente presente y robusto en casi todo el rango de revoluciones.

Figura 23.

Comparación de Prueba de Dinamómetro



5.4 Análisis Prueba Carga y Descarga

En la Tabla 20 se presenta la comparación entre los valores promedio obtenidos en las pruebas realizadas con la configuración anterior del vehículo y los resultados registrados en las pruebas correspondientes a la configuración actual. A partir de estos datos se observa que la distancia promedio recorrida aumentó de 46.25 km a 92.37 km, lo que representa un incremento cercano al 99.71 %. De igual forma, la velocidad máxima promedio se incrementó de 31.58 km/h a 102.86 km/h, evidenciando un aumento aproximado del 225.71 %. Por otro lado, el voltaje promedio de descarga de la batería pasó de 55.4 V a 61.6 V, mientras que el porcentaje promedio de desempeño disminuyó

de 91.98 % a 83.97 %, lo que puede estar relacionado con las mayores exigencias de operación del vehículo bajo las condiciones de prueba actuales.

Tabla 20.

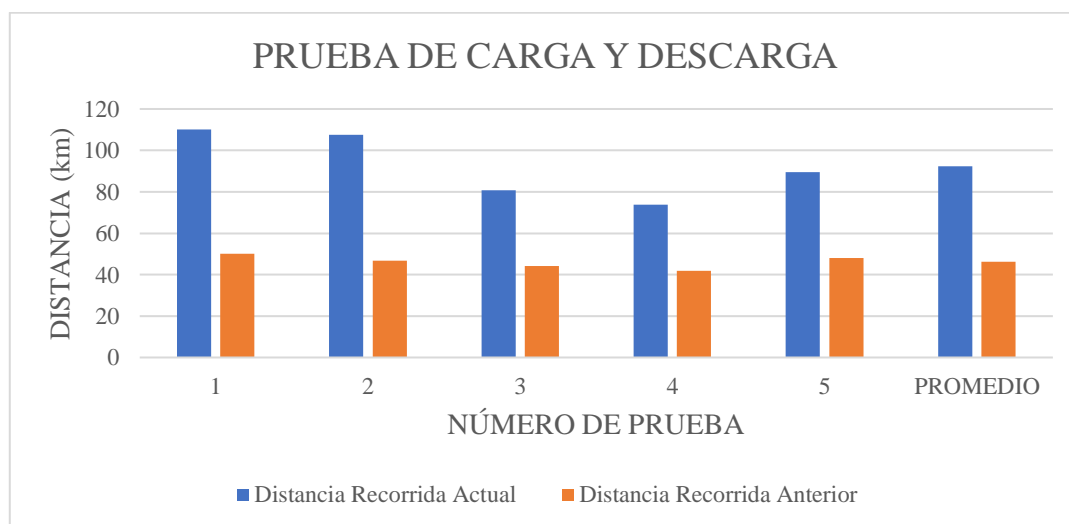
Comparación – Prueba de Carga y Descarga

Parámetro	Promedio Anterior	Promedio Actual	Diferencia
Distancia Recorrida	46.25 km	92.37 km	99.71 %
Velocidad Promedio	31.58 km/h	102.86 km/h	225.71 %
Porcentaje Promedio	91.98 %	83.97%	8.71 %

Los resultados que se demuestran en la Figura 24 da a notar una mejora considerable en la autonomía del vehículo con la nueva configuración del sistema de propulsión. Mientras que en la configuración anterior el vehículo lograba recorrer en promedio 46.25 km, con la implementación del nuevo sistema eléctrico la distancia promedio aumentó hasta 92.37 km. Este incremento cercano al 99.71 % demuestra una mejora significativa en la gestión energética del vehículo, atribuida principalmente al uso de baterías de litio y a la eficiencia de los motores eléctricos instalados.

Figura 24.

Comparación de Prueba de Carga y Descarga



5.5 Análisis Prueba Resistencia de 22 km

En la Tabla 21 se presenta la comparación entre los valores promedio obtenidos en las pruebas realizadas con la configuración anterior del vehículo y los resultados registrados con la configuración actual. Se puede observar que, la velocidad máxima promedio se incrementó de 29.86 km/h a 99.6 km/h, evidenciando un aumento del 233.55 % respecto a la configuración anterior. Por otro lado, el porcentaje promedio disminuyó de 98.32 % a 91.08 %, lo que representa una variación de 7.36 %, situación que puede atribuirse a las mayores exigencias operativas del vehículo al trabajar a velocidades considerablemente superiores.

Tabla 21.

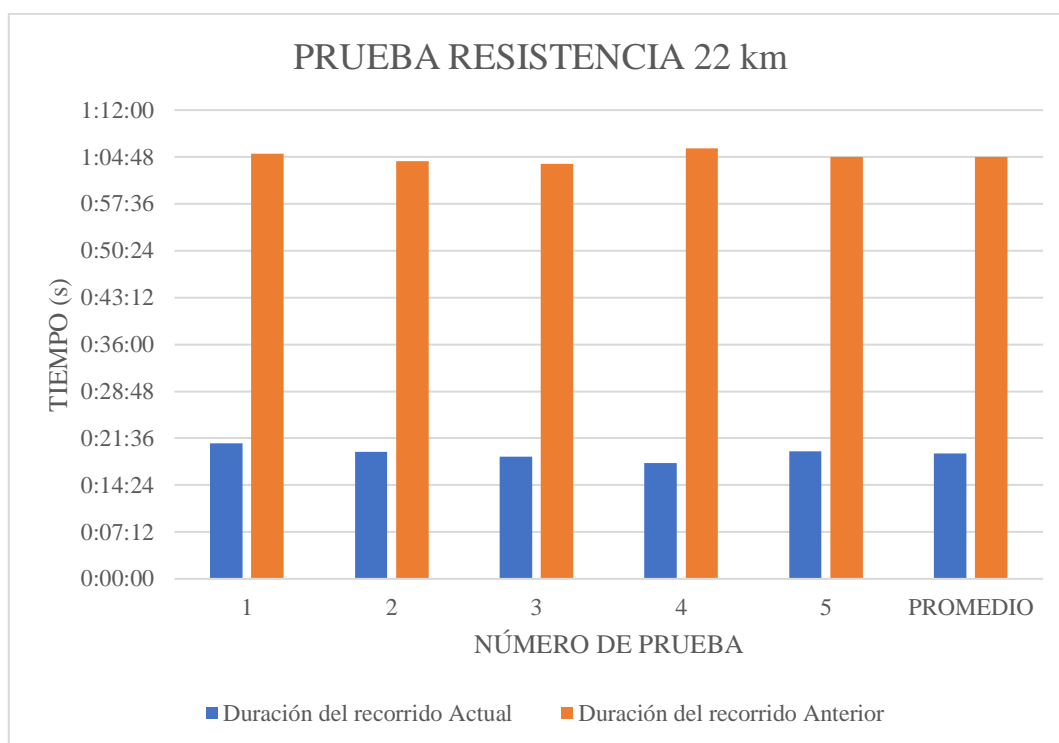
Comparación – Prueba de Resistencia de 22 km

Parámetro	Promedio Anterior	Promedio Actual	Diferencia
Distancia Recorrida	22 km	22.12 km	0.54 %
Tiempo promedio	1:04:50 s	00:19:16 s	70.28 %
Velocidad Promedio	29.86 km/h	99.6 km/h	233.55 %
Porcentaje Promedio	98.32 %	91.08 %	7.36 %

Como se detalla en la Figura 25, la comparativa de los tiempos de la prueba de resistencia sobre los 22 km muestra un salto de rendimiento. Los registros anteriores se situaban por encima de la hora de duración, el sistema actual ha logrado completar el mismo recorrido en un tiempo promedio cercano a los 20 minutos. Esta reducción, que representa un ahorro de tiempo superior al 65%, no solo evidencia una mayor velocidad alcanzable, sino que mantiene la eficiencia energética lograda con las nuevas modificaciones técnicas. Además, se observa una estabilidad notable en las cinco pruebas actuales, lo que confirma que el sistema es capaz de sostener este alto rendimiento sin sobrecalentarse ni perder potencia a lo largo de los 22 km.

Figura 25.

Comparación de Prueba de Resistencia de 22 km



5.6 Análisis Prueba Aceleración

Al analizar la Tabla 22, se observa una mejora en el rendimiento tras la implementación de los cambios, especialmente en la agilidad de respuesta. Mientras que la distancia recorrida se mantuvo constante en 75 m para garantizar una comparativa justa, el tiempo promedio de ejecución se redujo de 16.01 s a 9.87 s. Esta reducción representa una optimización del 38.35%, lo cual es un salto cualitativo importante en términos de eficiencia operativa.

Tabla 22.

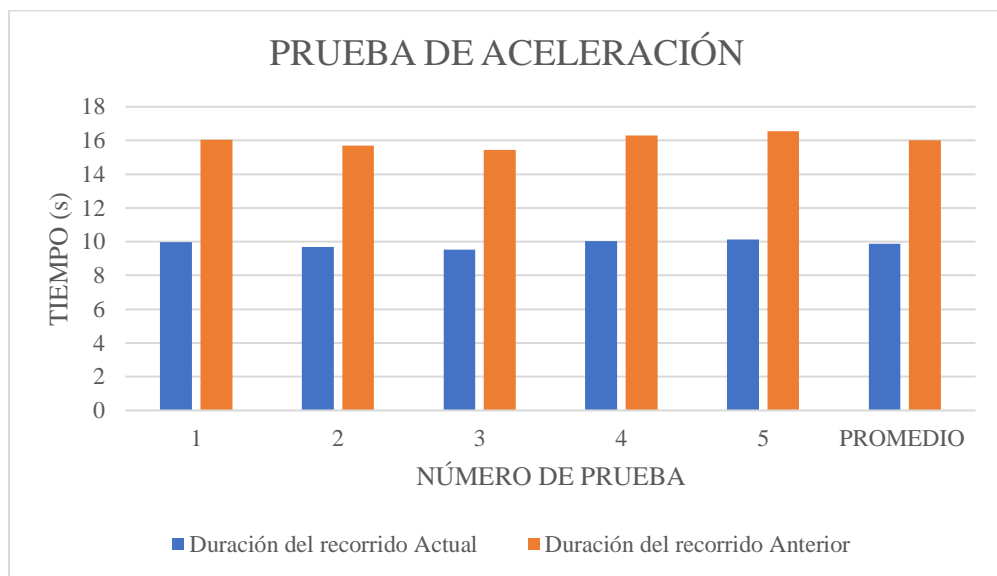
Comparación – Prueba de Aceleración

Parámetro	Promedio Anterior	Promedio Actual	Diferencia
Distancia Recorrida	75 m	75 m	0 %
Tiempo Promedio	16.01 s	9.87 s	38.35 %
Porcentaje Promedio	97.02 %	96.45 %	0.58 %

Como se observa en la Figura 26, la comparación de los tiempos de ejecución muestra una mejora clara y constante en el desempeño del sistema. Lo más destacable es que se logró reducir el tiempo promedio en un 38.35%; mientras que antes los registros solían superar los 15 segundos, con los ajustes actuales el prototipo se mantiene estable por debajo de los 10 segundos. Esta tendencia a la baja en cada una de las cinco pruebas confirma que los cambios establecieron un nivel de eficiencia mayor. Además, el sistema se mostró sumamente confiable, con una diferencia mínima de apenas el 0.58% entre pruebas, lo que valida que la propuesta técnica no solo es más rápida, sino también muy consistente.

Figura 26.

Comparación de Prueba de Aceleración



6. CONCLUSIONES

- Se determinó que el sistema requiere una potencia de 4.38 kW para cumplir con las metas de aceleración y velocidad máxima. En función de este dimensionamiento, se seleccionó un motor Brushless de corriente continua de 5000 W y un paquete de baterías de iones de litio totalmente. El modelo teórico estimó una autonomía de 76.41 km; sin embargo, en pruebas de campo se obtuvo una distancia recorrida real de 110 km, lo que representa un desempeño superior en un 43.96% respecto a los cálculos teóricos. Este resultado confirma no solo la viabilidad técnica del prototipo, sino también un margen de seguridad considerable en la gestión energética bajo condiciones reales de operación.
- Las pruebas realizadas en dinamómetro permitieron verificar el incremento en el rendimiento del sistema de propulsión implementado. Los resultados evidenciaron un aumento considerable en la velocidad punta del vehículo, que pasó de 30.1 km/h a 98.4 km/h, lo que representa un incremento del 208.85 %. De igual manera, la potencia máxima del sistema aumentó de 2.64 hp a 19.38 hp, equivalente a una mejora del 634.09 %, mientras que el par motor se incrementó de 4.84 Nm a 25.6 Nm, representando un aumento del 428.92 %. Asimismo, el régimen máximo del motor pasó de 4162 rpm a 7682 rpm, lo que equivale a una mejora del 84.57 %.
- Los resultados obtenidos en la prueba de Skidpad evidencian una mejora en el comportamiento dinámico del vehículo tras la implementación del nuevo sistema de propulsión eléctrica. El tiempo promedio registrado disminuyó de 34.67 s a 31.14 s, lo que representa una reducción aproximada del 10.18 % en el recorrido de la prueba. Esta mejora indica que el vehículo logró mantener una mayor estabilidad y capacidad de aceleración en curvas de radio constante. Además, el porcentaje promedio de desempeño aumentó de 95.87 % a 97.33 %, reflejando una ligera mejora del 1.52 % en la consistencia de los ensayos.

- Los resultados obtenidos en la prueba de carga y descarga evidencian una mejora considerable en el rendimiento energético del vehículo. La distancia promedio recorrida aumentó de 46.25 km a 92.37 km, lo que representa un incremento del 99.71 % en la autonomía respecto a la configuración anterior. Así mismo, la velocidad máxima promedio registrada durante estas pruebas pasó de 31.58 km/h a 102.86 km/h, reflejando un aumento del 225.71 %. A pesar de que el porcentaje promedio de desempeño disminuyó de 91.98 % a 83.97 %, equivalente a una reducción del 8.71 %, esta variación puede atribuirse al mayor nivel de exigencia del sistema al operar a velocidades significativamente superiores.

- La prueba de frenado permitió evaluar el comportamiento del sistema de frenos bajo condiciones de operación más exigentes. Los resultados muestran que la velocidad promedio durante las pruebas aumentó de 24.6 km/h a 35.2 km/h, lo que representa un incremento del 43.08 % respecto a la configuración anterior. Como consecuencia de este aumento de velocidad, la distancia promedio de frenado también se incrementó de 6.05 m a 7.55 m, equivalente a un 24.79 %. No obstante, el sistema de frenos mantuvo un desempeño adecuado, ya que el vehículo fue capaz de detenerse de forma controlada en todos los ensayos.

- Los resultados obtenidos en la prueba de durabilidad permitieron comprobar la capacidad del sistema de propulsión para operar durante recorridos prolongados. La distancia promedio recorrida aumentó de 46.25 km a 67.96 km, lo que representa una mejora del 46.94 % respecto a la configuración anterior del vehículo. De igual manera, la velocidad máxima promedio registrada durante la prueba aumentó de 31.58 km/h a 99.64 km/h, evidenciando un incremento del 215.51 % en el desempeño del prototipo. Por otro lado, el porcentaje promedio disminuyó de 91.98 % a 75.55 %, lo que corresponde a una reducción del 17.86 %, situación que puede explicarse por las mayores exigencias operativas del sistema al trabajar a velocidades considerablemente superiores durante periodos prolongados.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda evaluar la viabilidad de reducir la capacidad nominal del paquete de baterías en futuros prototipos. Considerando que la autonomía real superó ampliamente el objetivo, una reducción de masa en el sistema de almacenamiento mejoraría la relación peso-potencia del vehículo, incrementando su eficiencia dinámica sin sacrificar el cumplimiento de la autonomía mínima requerida.
- Tras observar una disminución en la eficiencia durante las pruebas de durabilidad y carga/descarga, se recomienda integrar un sistema de enfriamiento forzado para los motores. Esto es vital para estabilizar la temperatura de operación ante el incremento de potencia y régimen de giro alcanzado, evitando que el calor acumulado afecte el rendimiento en recorridos prolongados.
- Con los nuevos valores de par motor y revoluciones verificados en el dinamómetro, se recomienda ajustar la relación de transmisión final. El objetivo es aprovechar de mejor manera la entrega de torque en bajas velocidades para mejorar la agilidad en el Skidpad, sin sacrificar la velocidad máxima alcanzada en las pruebas de autonomía.
- Con el fin de mejorar la consistencia en pista, se recomienda la instalación de una pantalla OLED o LCD en el habitáculo. Esta debe mostrar de forma dinámica la velocidad, el tiempo, y fundamentalmente el estado de carga de las baterías.
- Debido a que el nuevo sistema de propulsión aumentó significativamente la velocidad promedio y punta, es necesario reforzar todo el sistema de frenado. Se recomienda el uso de materiales de mayor fricción o discos ventilados para compensar la mayor energía cinética y asegurar que la distancia de detención sea lo más corta y segura posible, acorde a las nuevas prestaciones de aceleración.
- Se recomienda realizar un rediseño de la relación de transmisión final orientado a desplazar el punto de operación del motor hacia su zona de máxima eficiencia

operativa durante regímenes de alta velocidad. Esta optimización permitirá equilibrar la entrega de par motor frente a la creciente resistencia aerodinámica, mitigando la caída en el rendimiento energético y recuperando autonomía sin comprometer la estabilidad térmica del sistema de propulsión ante las nuevas exigencias dinámicas del prototipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. S. Korobkov and O. V. Ufimtseva, “Choice of the Traction Motor for the Electric Racing Car ‘formula Student,’” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2016, pp. 283–288. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.004.
- [2] SAE International, “2025 Formula SAE Rules Draft Posted for Review and Comment.” Accessed: Nov. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/app/NewsItem.aspx?NewsItemID=3c9ca3eb-471e-472f-8453-99b943840ac7>
- [3] . IEEE Staff, 2009 IEEE Frontiers in Education Conference. IEEE, 2009.
- [4] M. Munaro, N. Bianchi, and G. Meneghetti, “The Formula SAE Electric Vehicle Competition: A High-Torque Density Permanent Magnet Motor,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 26, no. 6, pp. 76–86, Nov. 2020, doi: 10.1109/MIAS.2020.2982730.
- [5] 2016 IEEE 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME) : 20th-23rd of October 2016, Oradea, Romania. IEEE, 2016.
- [6] G. Devito, S. Nuzzo, D. Barater, G. Franceschini, L. Papini, and P. Bolognesi, “Design of the propulsion system for a formula sae racing car based on a brushless motor,” in *Proceedings - 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, WEMDCD 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Apr. 2021, pp. 318–324. doi: 10.1109/WEMDCD51469.2021.9425626.
- [7] 2017 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS). IEEE, 2017.
- [8] A. Gritsenko, V. Shepelev, A. Lopukhov, I. Makarova, P. Buyvol, and G. Parsin, “The Development of a Charger for the Formula Student Electric Race Car,” in *Proceedings - International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020, pp. 363–367. doi: 10.1109/DeSE51703.2020.9450773.
- [9] V. A. Kalmakov, A. A. Andreev, and G. N. Salimonenko, “Development of Formula Student Electric Car Battery Design Procedure,” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2016, pp. 1391–1395. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.334.
- [10] M. Gobbi, A. Sattar, R. Palazzetti, and G. Mastinu, “Traction motors for electric vehicles: Maximization of mechanical efficiency – A review,” *Appl. Energy*, vol. 357, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122496.
- [11] “II. MODELAGEM DO SISTEMA,” 2020.

- [12] X. Hu, H. Guo, H. Qian, X. Ding, and Y. Yang, "Development of a high-power-density motor for Formula Student Electric race car."
- [13] M. Volaric, I. Mikulic, and S. Stipetic, "Design of Permanent Magnet Synchronous Motor for Formula Student competition," in 2020 International Symposium on Industrial Electronics and Applications, INDEL 2020 - Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2020. doi: 10.1109/INDEL50386.2020.9266256.
- [14] "Formula SAE® Rules 2025 Rules 2025," 2024.
- [15] "Formula Student - Global Formula Racing." Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.global-formula-racing.com/en/formula-student/>
- [16] "¿Qué es la Fórmula Student? - Unex Motorsport." Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: <https://unexmotorsport.com/que-es-la-formula-student/>
- [17] "Formula SAE | Ingeniería del Automóvil." Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://motorycompeticion.wordpress.com/descargas/>
- [18] "Formula SAE - Club del Automóvil Nebrija." Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.nebrija.com/medios/clubdelautomovil/formula-sae/>
- [19] "2015 2016 Formula SAE Rules," 2014.
- [20] "Formula SAE® Rules 2024," 2023.
- [21] J. Zhou, Q. Han, and Y. Chen, "Design and analysis of the formula student car body based on CFD," in Proceedings - International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation, AIEA 2020, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2020, pp. 424–427. doi: 10.1109/AIEA51086.2020.00095.
- [22] "Aerodinámica de Formula Student con CFD | SimScale." Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/blog/formula-student-aerodynamics/>
- [23] "Proyectos CFD | SYMULA." Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: <https://symulacfd.com/proyectos-symula/>
- [24] Nascent Technologies in the Engineering Field (ICNTE), 2015 International Conference on. 2015.
- [25] "Introducción al Sistema de Propulsión Eléctrico y sus Componentes." Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.futurelearn.com/info/courses/exploring-the-world-of-electric-mobility-key-concepts-and-strategies-spanish/0/steps/408961>
- [26] "A. Energy Storage System B it c B it d Q E E K i it A e Q it Q Q E E K i K it A e it Q Q it E 0 K Q A B i * it."

- [27] “Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica.” Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://grupoindustronic.com/almacenamiento-energia-electrica/>
- [28] L. Kumar and S. Jain, “Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review,” 2014, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2013.09.014.
- [29] “Batería de óxido de cobalto y litio | Composición, cátodo y aplicaciones.” Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/es/bateria-de-oxido-de-cobalto-y-litio-composicion-catodo-y-aplicaciones/>
- [30] “Composición de la batería de iones de litio | Ánodo, cátodo y electrolito.” Accessed: Jan. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/es/composicion-de-la-bateria-de-iones-de-litio-anodo-catodo-y-electrolito/>
- [31] 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2009.
- [32] “INTRODUCCIÓN 2 2 CLASIFICACIÓN DE BATERÍAS SEGÚN SU FUNCIÓN 2 2.1. Batería Primaria 2 2.2. Batería Secundaria 2.” [Online]. Available: www.amperonline.com
- [33] “Baterías de níquel-cadmio (NiCd). - **Electrodaddy**.” Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://electrodaddy.com/baterias-de-niquel-cadmio-nicd/>
- [34] “Qué son las baterías LFP: ventajas, inconvenientes y aplicaciones en la automoción.” Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.motorpasion.com/revision/que-baterias-lfp-ventajas-inconvenientes-aplicaciones-automocion>
- [35] “BU-205: Types of Lithium-ion - Battery University.” Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [36] “Batería de óxido de cobalto de litio (LCO) - Fabricante de LiCoO2-battery-knowledge | Large Power.” Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://es.large.net/news/8ku43mw.html>
- [37] “¿Qué es una batería níquel metal hidruro? | Blog Pepeenergy.” Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.pepeenergy.com/blog/glosario/definicion-bateria-niquel-metal-hidruro/>
- [38] “Las baterías NMC de baterías Nickel-manganeso-cobalto: ilustración de stock 2310833739 | Shutterstock.” Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.shutterstock.com/es/image-illustration/nickelmanganesecobalt-nmc-battery-batteries-type-rechargeable-2310833739>
- [39] “Qué es mejor: batería VRLA o batería de iones de litio - PKENERGY |.” Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available:

- <https://www.pknergy.com/es/news/which-is-better-vrla-battery-or-lithium-ion-battery/>
- [40] V. Vaideeswaran, M. Ragul, V. Keerthana, C. S. Priyadharshini, and M. Prathiksha, “Review on Selection of Battery Packs for Pure Electric Vehicles and Technical Comparison of Battery Packs,” in 3rd IEEE International Virtual Conference on Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, i-PACT 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/i-PACT52855.2021.9696733.
- [41] “Características técnicas de los motores de imanes permanentes.” Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://es.enpmsm.com/news/drive-motor-differences-of-mainstream-new-energy-automobiles/>
- [42] “Tipos de motores de corriente alterna – Industrias GSL.” Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: https://industriassgsl.com/blogs/automatizacion/tipos-de-motores-de-corriente-alterna?srsltid=AfmBOoqKLG3RYjNdcxkLBuB_0xn9kF1d9c5Z0uz1tyMRT-ZiDdICtc1F
- [43] “¿Qué son los motores sin escobillas y qué ventajas ofrecen?” Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://ronixtools.com/es/blog/what-are-brushless-motors-and-what-advantages-do-they-offer/>
- [44] “Brushless (sin escobillas) | De Máquinas y Herramientas.” Accessed: Jan. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-electricas-y-accesorios/tecnologia-brushless-sin-carbones-intro>
- [45] “Comprender el papel de los controladores de motor en vehículos eléctricos - GTAKE.” Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.gtake.com/es/industry-news/the-role-of-motor-controllers/>
- [46] X. Shu, Y. Guo, H. Yang, H. zou, and K. Wei, “Reliability study of motor controller in electric vehicle by the approach of fault tree analysis,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 121, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.105165.
- [47] C. Alaoui and Z. M. Salameh, “A novel thermal management for electric and hybrid vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 2, pp. 468–476, Mar. 2005, doi: 10.1109/TVT.2004.842444.
- [48] 2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). IEEE, 2017.
- [49] “What is a BMS or Battery Management System? - GridPoint.” Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: https://www.gridpoint.com/blog/what-is-a-bms-or-battery-management-system/?utm_source=chatgpt.com
- [50] R. Ranjith Kumar, C. Bharatiraja, K. Udhayakumar, S. Devakirubakaran, K. S. Sekar, and L. Mihet-Popa, “Advances in Batteries, Battery Modeling, Battery

Management System, Battery Thermal Management, SOC, SOH, and Charge/Discharge Characteristics in EV Applications,” 2023, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3318121.

- [51] “MAXXIS MAZ1 175/50 R13 – Maxx Tires.” Accessed: Mar. 12, 2026. [Online]. Available: <https://maxxtires-ec.com/product/maxxis-maz1-175-50-r13/>
- [52] “\376\377\000C\000o\000n\000c\000e\000p\000t\000o\000s.”

ANEXOS

Anexo I. Prueba de Skidpad



Anexo II. Prueba de Frenado



Anexo III. Prueba Dinamómetro



Anexo IV. Prueba de Carga y Descarga



Anexo V. Prueba de Duración de 22 km



Anexo VI. Pesaje del Prototipo Formula Student

