



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA:

“ANÁLISIS DINÁMICO DE MOTOCICLETA CON PROPÓSITOS
DE IMPLEMENTACIÓN DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA”

AUTOR: PAÚL FERNANDO CIFUENTES RECALDE

DIRECTOR: CARLOS XAVIER ROSERO CHANDI

IBARRA-ECUADOR

2022



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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago 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 DEL AUTOR			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003689690		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Cifuentes Recalde Paúl Fernando		
DIRECCIÓN:	Hernán Gonzalez de Saa Y Julio Andrade, Ibarra		
EMAIL:	pfcifuentes@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0985028915
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO:	“ANÁLISIS DINÁMICO DE MOTOCICLETA CON PROPÓSITOS DE IMPLEMENTACIÓN DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA”		
AUTOR:	Paúl Fernando Cifuentes Recalde		
FECHA (DD-MM-AAAA):	29-07-2022		
SÓLO PARA TRABAJOS DE GRADO			
PROGRAMA:	PREGRADO		
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica		
ASESOR/DIRECTOR:	Ing. Carlos Xavier Rosero Chandi		

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización se desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 29 días del mes de Julio de 2022.



Paúl Fernando Cifuentes Recalde
C.I.: 1003689690



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CERTIFICACIÓN

En calidad de director del trabajo de grado “ANÁLISIS DINÁMICO DE MOTOCICLETA CON PROPÓSITOS DE IMPLEMENTACIÓN DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA”, presentado por el egresado PAÚL FERNANDO CIFUENTES RECALDE, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra, 29 de Julio 2022

Carlos Xavier Rosero
DIRECTOR DE TESIS

Agradecimiento

Gracias Dios por la existencia y brindarme tan preciada familia, que me ha apoyado cada oportunidad y aspiración.

A mi maestro Xavier Rosero, por permtirme unir mi afición a la mecánica y la ciencia, para concebir una invención que trasciende a una nueva era de movilidad.

Y a mi buen amigo Andrés Monteros, por su gran ayuda y buena voluntad, admirando mucho su trabajo y amabilidad.

Paúl Cifuentes

Dedicatoria

Con mucha felicidad para usted mi Gabrielita y nuestro pequeño Daniel, son el motor de mi esfuerzo y motivación cada día, los amo.

Y para Hugo, Jenny & Pame ustedes son lo mejor, gracias por formar parte de esto.

Paúl Cifuentes

Resumen

En la actualidad, es muy evidente la creciente presencia de vehículos eléctricos en el mundo, la responsabilidad ambiental del ser humano con la naturaleza trasciende con mejoras en la tecnología para el transporte y movilidad.

Las estructuras de vehículos eléctricos modernos no presentan diferencias significativas con sus antecesores de motores a combustión interna, de tal manera que reutilizarlos para procesos de electrificación es una alternativa ante la posibilidad de dejarlos a merced de procesos de chatarrización en consideración al impacto ambiental.

El en presente trabajo se desarrolla un procedimiento para determinar el requerimiento de potencia necesario por el motor eléctrico para llevar a cabo una propulsión eléctrica en una motocicleta diseñada a funcionar con un motor de combustión.

Las pruebas de validación del prototipo confirman la posibilidad de llevar a cabo una conversión eléctrica de motocicleta en un escenario en particular.

Abstract

At present, the growing presence of electric vehicles in the world is very evident, the environmental responsibility of human beings with the environment transcends with improvements in technology for transportation and mobility.

The structures of modern electric vehicles do not present significant differences with their predecessors with internal combustion engines, so that reusing them for electrification processes is an alternative to the possibility of leaving them at the mercy of scrap processes in consideration of the environmental impact.

The present work develops a procedure to determine the power requirement needed by the electric motor to carry out an electric propulsion in a motorcycle designed to operate with a combustion engine.

The validation tests of the prototype confirm the possibility of carrying out an electric motorcycle conversion in a particular scenario.

Índice general

Índice general	IX
Índice de figuras	XIII
Índice de cuadros	XVII
1. Introducción	1
1.1. Alcance	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Estructura del documento	2
2. Revisión Literaria	3
2.1. Generalidades	3
2.2. Consideraciones en conversiones eléctricas: motocicletas	5
2.3. Introducción a la dinámica del vehículo	7
2.3.1. Sistema de ejes del vehículo	8
2.3.2. Movimiento de traslación longitudinal	9
2.4. Estudios de fuerzas longitudinales en unidades eléctricas	10
2.5. Principales fuerzas de oposición en el desplazamiento longitudinal	13
2.5.1. Fuerza de resistencia a la rodadura	13

2.5.2.	Fuerza de arrastre aerodinámico	16
2.5.3.	Fuerza de ascenso en pendiente	18
2.5.3.1.	Graduabilidad	19
2.5.4.	Fuerza neta	20
3.	Modelo de estimación de potencia eléctrica	22
3.1.	Modelo propuesto	22
3.2.	Registro preferencial	24
3.3.	Registro de variables	24
3.4.	Estudio dinámico	25
3.5.	Determinación de requerimientos	25
3.5.1.	Torque	25
3.5.2.	Potencia mecánica y eléctrica	25
4.	Implementación y pruebas	27
4.1.	Iteración del modelo	28
4.1.1.	Vehículo donante	28
4.1.2.	Registro preferencial del usuario	28
4.1.3.	Registro de variables	29
4.1.3.1.	Masa de la motocicleta	29
4.1.3.2.	Masa del piloto	29
4.1.3.3.	Área frontal	30
4.1.3.4.	Temperatura de ambiente de operación	31
4.1.3.5.	Densidad del aire	31
4.1.4.	Cálculo de la fuerza de tracción del modelo	32
4.1.4.1.	Cálculo de fuerza de resistencia a la rodadura	32
4.1.4.2.	Cálculo de fuerza de arrastre aerodinámico	33
4.1.4.3.	Cálculo de fuerza de ascenso en pendiente	34
4.1.4.4.	Cálculo de fuerza neta	34

4.1.4.5.	Fuerza total de tracción	35
4.1.5.	Cálculo de torque y potencia	35
4.1.5.1.	Torque necesario	35
4.1.5.2.	Potencia mecánica del sistema	35
4.1.5.3.	Potencia eléctrica requerida	36
4.2.	Implementación práctica	37
4.2.1.	Selección de motor eléctrico	37
4.2.1.1.	Cuadro de alternativas	37
4.2.1.2.	Criterios de selección	38
4.2.1.3.	Selección de alternativa	40
4.2.2.	Selección de controlador	41
4.2.3.	Selección de batería eléctrica	43
4.2.3.1.	Criterios de selección	43
4.2.3.2.	Cuadro de alternativas	45
4.2.3.3.	Selección de alternativa	46
4.2.4.	Selección de componentes adicionales	46
4.2.4.1.	Mecánicos	46
4.2.4.2.	Eléctricos y Electromecánicos	52
4.2.5.	Ensamblaje experimental de la batería eléctrica	56
4.2.5.1.	Aspecto teórico	56
4.2.5.2.	Segmento práctico	58
4.2.6.	Ensamblaje mecánico	63
4.2.6.1.	Soportes del motor eléctrico	63
4.2.6.2.	Estructura de soporte para batería eléctrica	65
4.2.7.	Conexión eléctrica	68
4.2.8.	Configuración de dispositivos	70
4.3.	Pruebas de validación	72
4.3.1.	Prueba A	73

4.3.1.1. Resultados en prueba A	74
4.3.2. Prueba B	78
4.3.2.1. Resultados en prueba B	79
4.4. Costo de equipos y materiales	81
5. Conclusiones y Trabajo Futuro	83
5.1. Conclusiones	83
5.2. Recomendaciones	85
5.3. Trabajo futuro	85
Anexos	87
A. Curva de eficiencia motor QS138-70H	88
B. Ponderación de criterios: Motor eléctrico	89
C. Ponderación de criterios: Batería eléctrica	90
D. Diagrama eléctrico	91
Bibliografía	92

Índice de figuras

2.1. Abreviaturas en vehículos eléctricos [1].	4
2.2. Incremento de motocicletas en la población de Indonesia [2].	5
2.3. Horas de mantenimiento empleadas en unidades ICE vs. Eléctricas [2].	5
2.4. Sistema de ejes del vehículo - SAE [5].	8
2.5. Fuerzas de principal imposición al movimiento longitudinal	9
2.6. Resistencia a la rodadura vs. Arrastre aerodinámico [5]	11
2.7. Parámetros requeridos del modelo de Blissett [9]	12
2.8. Dirección de la fuerza de resistencia a la rodadura [11]	14
2.9. Relación de μ_{rr} con velocidad y tipo de neumático [5]	15
2.10. Relación de μ_{rr} con presión de inflado y tipo de terreno [5]	15
2.11. Coeficiente aerodinámico y formas típicas de vehículos [3]	16
2.12. Modelo CAD de motocicleta.	17
2.13. Análisis CFD en software Solidworks	17
2.14. Fuerza de ascenso en pendiente F_{hc}	18
2.15. Ángulo de inclinación del terreno [3]	18
2.16. Motor eléctrico QSMOTOR - 138	20
2.17. Motor eléctrico Enertrac MHM-603	21
3.1. Diagrama de modelo propuesto	23
4.1. Motocicleta Honda CRF 450R3	28

4.2. Medición de masa de la motocicleta	29
4.3. Medición de masa del piloto	30
4.4. Medición de área frontal de motocicleta y piloto	30
4.5. Diseño ergonómico CAD del objeto de estudio.	31
4.6. Línealización del coeficiente de rodadura por tipo de neumático	32
4.7. Análisis CFD del objeto de estudio	33
4.8. Proyección del espacio disponible en alternativa 1	39
4.9. Motor QS138-70H	42
4.10. Controlador Votol EM200/2.	42
4.11. Características publicitarias Votol EM200/2	43
4.12. Reporte de desempeño del motor Qs138-70H	47
4.13. Piñón 13T-428, QsMotor	49
4.14. Catalina Scorpion 54T-6H-428	50
4.15. Factor de servicio F_a [23]	50
4.16. Selección de cadena de transmisión mediante catálogo SKF [23]	52
4.17. Cadena 08B-01, USA Roller Chain	52
4.18. BMS Daly modelo Smart li-ion 72V 20s 150A	53
4.19. Relay Noco ZJ200D	53
4.20. Conversor Mean Well DC-DC <i>RSD-60H-12</i>	54
4.21. Cable conductor Ultraflex AWG 1/0	55
4.22. Catálogo cables Ultraflex [24]	56
4.23. Batería BAK 21700	57
4.24. Medición de espacio disponible para batería	57
4.25. Batería eléctrica de 72V y 75Ah	59
4.26. Impresión 3D de separadores de batería	59
4.27. Armado de batería con separadores	60
4.28. Soldadura de puntos en batería eléctrica	60
4.29. Esquema de conexión de batería eléctrica y BMS	61

4.30. Unión por soldadura en cables del BMS a batería	61
4.31. Conexión de BMS y batería eléctrica	62
4.32. Carcasa metálica para batería eléctrica	62
4.33. Soportes de motor eléctrico	63
4.34. Pivote de rueda posterior y centro de piñon motriz	63
4.35. Análisis estático de soporte frontal	64
4.36. Análisis estático de soporte posterior	65
4.37. Carcasa de batería eléctrica y soporte	66
4.38. Ensamble mecánico principal de motor eléctrico y batería	66
4.39. Análisis estático del case de batería eléctrica	67
4.40. Análisis estático del soporte de batería batería	68
4.41. Interruptor 1 en el diagrama eléctrico general	68
4.42. Interruptor 2 en el diagrama eléctrico general	69
4.43. Interruptor 3 en el diagrama eléctrico general	69
4.44. Interfaz de usuario BMS DALY	70
4.45. Configuración de voltaje y corriente en BMS	71
4.46. Configuración de temperatura en BMS	71
4.47. Configuración de controlador Votol EM200/2	72
4.48. Prototipo	73
4.49. Inicio de la prueba de conducción A	73
4.50. Registro del consumo de batería en prueba A	74
4.51. Registro de distancia recorrida en A	75
4.52. Lectura de voltaje en BMS	75
4.53. Lectura de corriente en BMS	76
4.54. Gráfica de registro de temperatura en batería	77
4.55. Lectura de voltaje mínimo en batería eléctrica	77
4.56. Medición de temperatura de los componentes	78
4.57. Transcurso de la prueba de conducción B	79

4.58. Tiempo de conducción en prueba B	79
4.59. Interfaz BMS en prueba B	80
4.60. Voltaje mínimo en prueba B	80

Índice de cuadros

2.1. Porcentaje de inclinación y ángulo de inclinación del terreno [3]	19
3.1. Registro de limitaciones iniciales	24
3.2. Registro de datos de entrada	24
4.1. Registro preferencial en la implementación	28
4.2. Registro de variables en la implementación	29
4.3. Alternativas de selección de motor eléctrico	37
4.4. Ponderación de criterios de motor eléctrico	41
4.5. Selección de alternativa de motor eléctrico	41
4.6. Parametros de selección del controlador	42
4.7. Ponderación de criterios de batería eléctrica	45
4.8. Alternativas de selección de batería eléctrica	45
4.9. Matriz de selección de batería eléctrica	46
4.10. Características principales Relay ZJ200D	53
4.11. Características principales conversor DC-DC	54
4.12. Registro de temperatura en prueba A	78
4.13. Registro de temperatura en prueba B	81
4.14. Precio de equipos y accesorios	81
4.15. Precio de materiales	82

Capítulo 1

Introducción

En este apartado se expone la propuesta original del trabajo de grado. Se presenta el alcance deseado, objetivos del proyecto y estructura del documento.

1.1. Alcance

Se realizará el análisis de la dinámica de una motocicleta, para definir un modelo útil en la determinación de los requerimientos de potencia para una conversión eléctrica. Además, una selección e implementación del sistema eléctrico para una motocicleta Honda CRF450R3. El desempeño del prototipo validará el modelo a través de pruebas de conducción reales, bajo condiciones climatológicas favorables, debido a que el prototipo no presentará un grado de protección contra agentes externos, puesto que su aplicación será de carácter experimental para el presente trabajo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Analizar la dinámica de una motocicleta con el objetivo de la implementación de propulsión eléctrica.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Revisar propuestas de análisis de características dinámicas generales e incidencia de la implementación de propulsión eléctrica en la motocicleta.
- Proponer un modelo para el análisis de la dinámica de la motocicleta considerando la implementación de un conjunto eléctrico de propulsión.
- Aplicar el modelo desarrollado en la selección de un sistema eléctrico de propulsión real seguido de pruebas de conducción para una motocicleta en específico.

1.3. Estructura del documento

La obra está constituida por cinco capítulos. El segundo capítulo, presenta una revisión de la literatura referente a características dinámicas generales y procesos de conversión eléctrica en motocicletas. La descripción del modelo desarrollado se realiza en el tercer capítulo. El cuarto capítulo, muestra la implementación real del modelo y pruebas de validación del prototipo.

Capítulo 2

Revisión Literaria

En la implementación de conjuntos eléctricos, en sustitución de sistemas convencionales de propulsión de vehículos, es fundamental conocer el requerimiento de potencia necesaria del motor eléctrico, para un correcto desempeño en base a las capacidades requeridas o propuestas para el modelo final. La fuerza necesaria para poner la motocicleta en marcha, está influenciada por el comportamiento dinámico que ésta presenta, debido a una variedad de fuerzas que se oponen e influyen en su desplazamiento. Este capítulo expone una serie de aspectos dinámicos principales, para la determinación de dichas fuerzas.

2.1. Generalidades

Se puede comprender sobre un proceso de conversión eléctrica, como una sustitución de su sistema de propulsión original (e.g., motores de combustión interna ICE), al acoplamiento de un nuevo sistema primario basado en motores eléctricos, en el cual su fuente de energía es la electricidad. De esta manera, integrándose al conjunto de vehículos eléctricos abreviados E.V. por sus siglas en inglés (Electric Vehicle). Esta noción de vehículo eléctrico es fortalecida por Eisenman *et al.*, dónde se describe el concepto de vehículo eléctrico como “[...] son vehículos con al menos un motor eléctrico y un sistema de suministro de energía para el propósito de propulsión del vehículo” [1]. Aunque no se define que la unidad de suministro de energía ne-

cesariamente pueda estar a bordo, inclusive alimentando la posibilidad de que una red eléctrica pueda convertirse el suministro principal de energía o al menos ser un objeto de estudio.

Por otra parte, esta definición no segrega entre vehículos previamente desarrollados como productos eléctricos versus prototipos de conversión e hibridación de algún tipo. Dentro del conjunto de vehículos eléctricos, existe una amplia abreviatura respecto a sus variantes, como se puede observar en la Figura 2.1, donde no todos los tipos o subtipos de E.V. se recopilan o describen. Aunque, se da a conocer la información con el fin de exponer la variedad de sistemas de electrificación que pueden ser integrados dentro de una unidad vehicular, sin considerar sus características. Cabe mencionar, que no toda subclasificación de E.V. propone que el motor eléctrico sea el principal sistema de propulsión, o que la electricidad sea la única forma de energía consumida para su funcionamiento.

<i>Nombre</i>		<i>Descripción</i>
CV	VEHÍCULO CONVENCIONAL	Vehículo con un motor de combustión para la propulsión del vehículo
EV	VEHÍCULO ELÉCTRICO	Vehículo con al menos un motor eléctrico y un sistema de suministro de energía eléctrica para la propulsión del vehículo
BEV	VEHÍCULO ELÉCTRICO DE BATERÍA	Vehículo eléctrico que tiene una batería como sistema de almacenamiento de energía eléctrica en el vehículo
FCEV	VEHÍCULO ELÉCTRICO DE PILA DE COMBUSTIBLE	Vehículo eléctrico que tiene una pila de combustible como sistema de generación a bordo del vehículo
HEV	VEHÍCULO ELÉCTRICO HÍBRIDO	Vehículo eléctrico que tiene otro convertidor de energía (e.g., motor de combustión) y un sistema de suministro de energía (combustible) para la propulsión del vehículo

Figura 2.1: Abreviaturas en vehículos eléctricos [1].

El propósito de un proceso de conversión eléctrica, podría satisfacer preferencias o necesidades tanto económicas, ambientales o de desempeño. El estudio en [2] expone la sostenibilidad en procesos de conversión eléctrica en motocicletas, con enfoque económico, social y ambiental en la población de Indonesia. Población que ha registrado un incremento de al menos 113 millones de unidades de motocicletas en el año 2019 (Fig. 2.2). El trabajo en mención, expone un análisis del retorno a la inversión, nivel de ruido ambiental y menor contaminación, de manera favorable a la alternativa de conversión eléctrica en motocicletas, versus otras alternativas que proponen el continuo uso de motores de combustión interna, o la venta del vehículo para la adquisición de una motocicleta eléctrica nueva. Por otra parte, también expone una comparación

del tiempo implementado para el mantenimiento en una unidad con motor ICE, por sus siglas en inglés (Internal Combustion Engine) y otra unidad con motor eléctrico (Fig. 2.3).

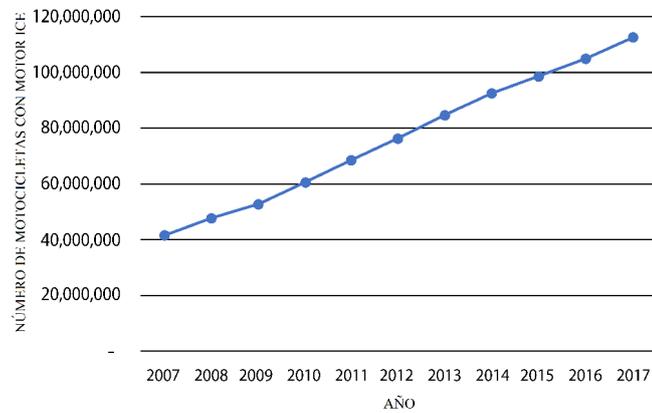


Figura 2.2: Incremento de motocicletas en la población de Indonesia [2].

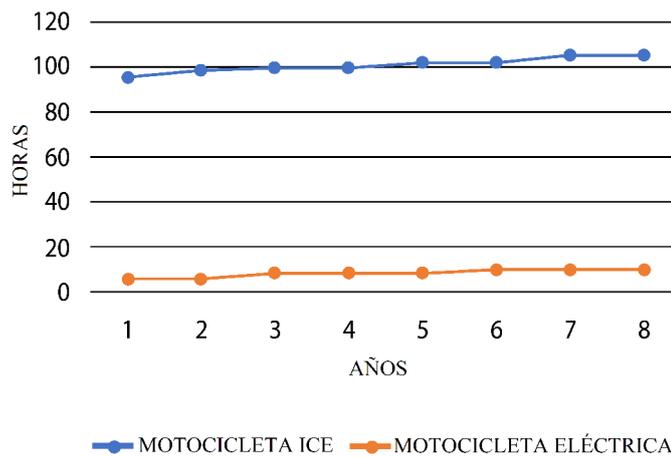


Figura 2.3: Horas de mantenimiento empleadas en unidades ICE vs. Eléctricas [2].

2.2. Consideraciones en conversiones eléctricas: motocicletas

En la dinámica del vehículo, intervienen amplios y vastos principios, y en un sentido más amplio estos abarcan todas las formas de transporte. Antiguamente, la deficiencia del estudio dinámico, fué producto de la carencia de herramientas computacionales para facilidad del cálculo matemático [5].

En un proceso de conversión eléctrica en motocicletas, será necesario considerar características físicas de serie del vehículo donante, debido a que en su mayoría, fueron concebidos en su fase inicial de diseño, para requerimientos de propulsión con un motor ICE. Como es el caso del presente trabajo de investigación.

Foale, señala que en el diseño de una armadura de motocicleta, hay que adoptar ciertas consideraciones estructurales, como la rigidez y resistencia mecánica [6]. Por consiguiente, se puede concluir que, el diseño estructural de serie de una motocicleta ya estima la dinámica que va a presentar el vehículo, durante cierto estilo de conducción y bajo una unidad de propulsión previamente diseñada.

Esto, debido a que el termino de rigidez y resistencia mecánica, hacen referencia a la capacidad de un objeto a resistir la deformación bajo una carga sometida. Y, una medida de la carga que puede aplicarse al elemento antes de que se produzca una falla o deformación, respectivamente [7].

Además, se puede deducir que una determinada estructura vehicular de serie, estará diseñada para un estilo de conducción y características de motor en específico. Por tal motivo, exceder los valores de torque, potencia y peso con el nuevo sistema de propulsión, podría comprometer la estructura.

Vogel, en su obra sobre construcción de una motocicleta eléctrica, propone una serie de estrategias y consideraciones para el desarrollo de un vehículo eléctrico puro. Un criterio muy importante, fué el de describir tres componentes cruciales en el diseño o conversión eléctrica. El motor eléctrico, controlador y la fuente de energía o batería eléctrica, son los equipos principales y requieren estar relacionados entre sí. Además, menciona que “[...] cada decisión y cambio que se realice tendrá un gran efecto“ [3]. Esto concuerda con Mohamed-Nour, y su conclusión sobre que las consideraciones de diseño para una motocicleta eléctrica eficiente, son más simples de aplicar en un vehículo más grande. Por las restricciones de espacio-peso que una motocicleta presenta [4].

Existen más componentes que participan en la conversión, como materiales y dispositivos de seguridad para la instalación eléctrica, o a su vez, componentes de mayor consideración

como el de convertidores DC-DC cuando los dispositivos adicionales requieren un suministro aislado de energía eléctrica de la batería. Además, es posible la implementación de un Variador de Frecuencia para sistemas que trabajan con corriente alterna. Estos dispositivos convierten la potencia eléctrica de corriente directa de la batería a potencia de corriente alterna, a una frecuencia y amplitud requerida por el motor y controlador de CA [3].

Partiendo de los elementos principales, éstos deben cumplir ciertos requerimientos iniciales que satisfagan vuestra demanda al momento de la validación de desempeño del prototipo. Y para lograr esto, hay que determinar ciertas magnitudes físicas y comprender el comportamiento dinámico al que está regido el vehículo para la eficiente selección de los componentes.

2.3. Introducción a la dinámica del vehículo

La dinámica del vehículo es relativa a las maniobras que el vehículo puede ejecutar durante su operación [5], y para efectos de éste estudio, sobre unidades vehiculares diseñadas a operar sobre una superficie terrestre, como motocicleta. Las principales maniobras son: aceleración, conducción, giro y frenado.

La dinámica del vehículo, está regida por un grupo de fuerzas que se imponen al movimiento del objeto [5], por fuentes como:

- *Neumáticos o rodadura*
- *Aerodinámica*
- *Gravedad*

El punto de interés en el análisis de la dinámica del vehículo, es analizar la respuesta al comportamiento del vehículo (y sus partes), ante las fuerzas generadas por las fuentes mencionadas, bajo determinadas condiciones iniciales de conducción y ajuste [5].

2.3.1. Sistema de ejes del vehículo

Gillespie, menciona que, la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) ha establecido una convención para el sistema de ejes del vehículo, como se observa en la Figura 2.4. Mediante este sistema se puede representar *fuerzas y momentos* que interactúan en la dinámica del vehículo.

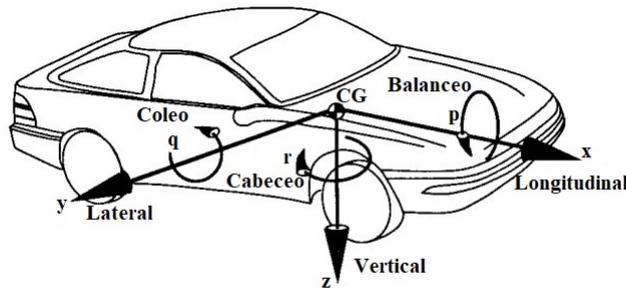


Figura 2.4: Sistema de ejes del vehículo - SAE [5].

Las coordenadas del sistema son:

- x : hacia delante y en el plano longitudinal
- y : lateral hacia el lado derecho
- z : hacia abajo respecto al vehículo
- p : velocidad de balanceo o *Roll* en torno al eje x
- q : velocidad de coleo o *Pitch* en torno al eje y
- r : velocidad de cabeceo o *Yaw* en torno al eje z

Por lo tanto, en un vehículo al considerarlo como un cuerpo o elemento rígido obtiene seis grados de libertad (GDL), de **Traslación**: a lo largo de los ejes x (*longitudinal*), y (*lateral*) y z (*vertical*), y de **Rotación**: alrededor de los ejes x (*roll*), y (*pitch*) y z (*yaw*).

Además, en la Figura 2.4 se puede observar que el origen de coordenadas del sistema parte del *centro de gravedad* o punto *CG*, y este se desplaza con el vehículo con referencia a un sistema de coordenadas ortogonal [5].

El vehículo se encuentra constituido por la unión de varios componentes, y para propósitos de análisis se puede considerar que todos los componentes se desplazan juntos. De tal manera que se representa como una sola masa ubicada en su *centro de gravedad*.

Gillespie, manifiesta que “[...] para la representación de una sola masa, el vehículo se trata como una masa concentrada en su centro de gravedad. La masa puntual en el punto CG con momentos de inercia rotativos adecuados, es dinámicamente equivalente al propio vehículo, para todos los movimientos en los que es razonable suponer que el vehículo es rígido”[5]. Para ciertos análisis, al vehículo se lo considera conformado por grupos de masas separadas como: *masa suspendida* y *masa no suspendida*. Toda aquella masa que se localice en la parte superior de la suspensión, se denomina *masa suspendida*. Ciertos componentes como las ruedas, sistemas de frenos, y más accesorios que no consten en la parte superior de la suspensión, se denomina como *masa no suspendida* [6].

2.3.2. Movimiento de traslación longitudinal

La dirección de desplazamiento del vehículo coincide con el eje longitudinal x , como en la Fig. 2.4. Principalmente, en esa dirección se presentan fuerzas que se imponen al movimiento [5]. Como se observa en la representación de la Figura 2.5.

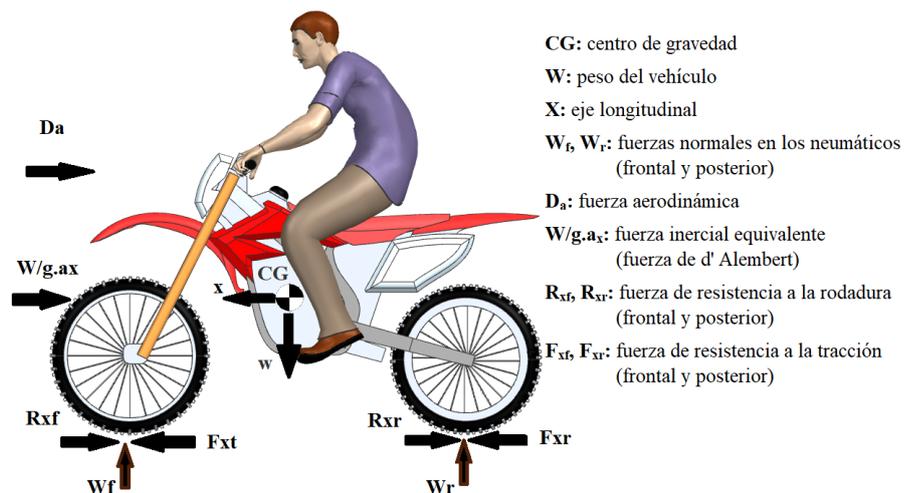


Figura 2.5: Fuerzas de principal imposición al movimiento longitudinal

Donde la fuerza de tracción o longitudinal F (en *Newtons*), es la componente en el eje x de la fuerza resultante que se ejerce sobre el neumático [12].

Además, del movimiento de traslación en el eje longitudinal, también existen otros movimientos principales que se relacionan con la manejabilidad del vehículo, como son: movimientos traslacionales laterales y movimiento rotacional de *Yaw* [13]. Que se presenta en maniobras de aceleración, conducción, giro y frenado.

Para efectos de una conversión eléctrica de motocicleta, el reemplazo de la unidad de propulsión tiene un impacto en la maniobra de aceleración, dado que éste elemento es el responsable de crear la fuerza necesaria de empuje. La modificación de componentes en una motocicleta puede alterar su *centro de gravedad*, influyendo también en las diferentes maniobras durante su conducción.

Por lo tanto, en el estudio se analiza las principales fuerzas de imposición al movimiento que actúan en el eje longitudinal, y se determina la fuerza de tracción requerida por el motor eléctrico. Para el desplazamiento del vehículo durante un escenario de conducción en particular.

2.4. Estudios de fuerzas longitudinales en unidades eléctricas

En [3], se propone que el valor de potencia requerida del motor eléctrico se determine mediante el cálculo de una fuerza resultante mayor, misma que se descompone en cinco fuerzas inmersas en la dinámica de la motocicleta. La ecuación en cuestión es expresada como

$$F = F_a + F_h + F_r + F_d + F_w, \quad (2.1)$$

donde F es la fuerza de tracción resultante, F_a es la fuerza de aceleración, F_h es la fuerza de asención, F_r es la fuerza de resistencia a la rodadura, F_d es la fuerza de arrastre aerodinámico y F_w es la fuerza de contribución del viento al arrastre aerodinámico.

Gillespie, propone que algunas fuerzas pueden ser más considerables que otras dependiendo el caso. Por ejemplo, la fuerza de resistencia a la rodadura a bajas velocidades, se considera la principal fuerza de resistencia al movimiento en una calzada de pavimento duro. Sin embargo,

en un terreno fuera de carretera y sin inclinación, la resistencia a la rodadura se puede considerar la única fuerza de retardo significativa [5].

De igual manera, en [7], se sostiene que la fuerza aerodinámica elevada entre el rango de 75 a 85 km/h, puede superar el valor de la resistencia a la rodadura. Como se puede suponer en la Figura 2.6.

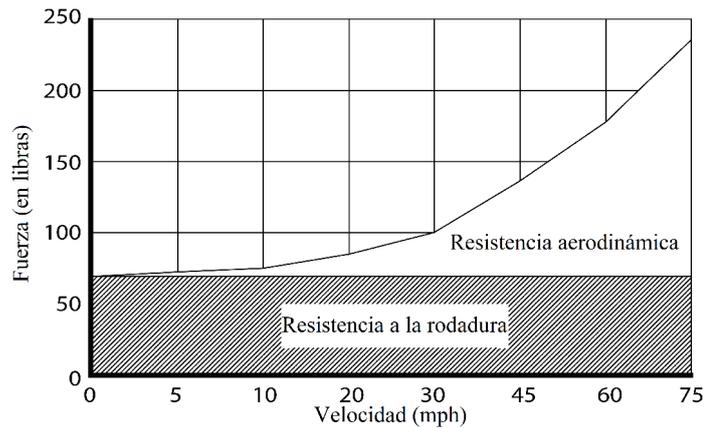


Figura 2.6: Resistencia a la rodadura vs. Arrastre aerodinámico [5]

Maxwell, considera también estas fuerzas impuestas al movimiento para la determinación de potencia requerida del motor eléctrico en su implementación (Ecuación 2.2), proponiendo un modelo matemático en forma de una ecuación diferencial no lineal de segundo orden (Ecuación 2.3). Que mediante software matemático, se brindanda la posibilidad de analizar y simular en graficas del rendimiento y comportamiento del sistema.

$$F_{Motor} = F_{Inertial} + F_{Rolling} + F_{Drag} + F_{Gravity}, \quad (2.2)$$

$$\ddot{x} = \frac{F_{motor}(t)}{m} - \frac{\frac{1}{2}\rho C_d A_f (V_{bike} + V_{wind})^2}{m} - g \sin \theta - g C_r. \quad (2.3)$$

Blissett, considera también la fuerza de resistencia a la rodadura y arrastre aerodinámico, para su análisis del modelo de una motocicleta eléctrica de competición, implementando herramientas de simulación y software matemático (Fig. 2.7).

<i>Categoría</i>	<i>Descripción</i>
Vehículo	Distribución del peso Altura de centro de gravedad Coeficiente de arrastre Resistencia a la rodadura Inercia rotacional

Figura 2.7: Parametros requeridos del modelo de Blissett [9]

La implementación de software matemático, permite mejorar la capacidad del análisis e integrar más información sistema o modelo, para mejorar su estudio.

Es así, que en [10], se propone una metodología implementando simulación en software como; Matlab y Simulink, para la optimización energética de un vehículo eléctrico. Además, se propone el uso de un ciclo de conducción estandarizado, para simular el consumo de potencia eléctrica. Aplicando una expresión matemática para la determinación de la fuerza de tracción necesaria, definida como

$$F_t = F_{net} + F_{hc} + F_{ad} + F_{rr}, \quad (2.4)$$

donde F_t es la fuerza de tracción, y es igual a la sumatoria de; la fuerza neta F_{net} , fuerza de ascenso a la pendiente F_{hc} , fuerza de arrastre aerodinámico F_{ad} y la fuerza de resistencia a la rodadura F_{rr} .

Se implementa este modelo matemático en la determinación de la potencia necesaria, para la conversión eléctrica del presente proyecto. La información propia del vehículo y requerimientos del usuario se consideran para el análisis dinámico del sistema.

Esto concuerda con Mohamed, quien menciona que [...] “Un aspecto vital del proceso de diseño es la capacidad de hacer predicciones sobre le rendimiento del sistema, sin tener que construirlo realmente.” [4].

2.5. Principales fuerzas de oposición en el desplazamiento longitudinal

Existe una ley fundamental, de la que parten los principales análisis de la dinámica de vehículos, se trata de la segunda ley formulada por Sir Isaac Newton (1642-1727). Dicha ley, se aplica tanto al sistema traslacional, como al sistema rotacional [5].

En un *sistema traslacional* (Fig. 2.4), en a la dirección de desplazamiento del vehículo, la sumatoria de las fuerzas externas longitudinales que actúan sobre el cuerpo, es igual al producto de su masa por la aceleración. En una dirección determinada, y además, considerando que la masa del objeto es fija [5].

$$\sum F_x = Ma_x, \quad (2.5)$$

donde F_x es la fuerza en dirección x , M es la masa del cuerpo y a_x es la aceleración en dirección x .

En la determinación de la fuerza de tracción resultante, se realiza el análisis de las fuerzas que se imponen al movimiento en el eje longitudinal x .

2.5.1. Fuerza de resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura, es una de las mayores fuerzas de resistencia al nivel del terreno producida por los neumáticos. Además, representa la pérdida de energía en la banda de rodadura y paredes del neumático. La energía perdida en la banda de rodadura en contacto con el terreno, se debe a la histéresis del neumático. En la Figura 2.8 se observa que, la dirección de esta fuerza es opuesta a la del movimiento del vehículo [11].

La resistencia a la rodadura, está presente desde el instante en que el vehículo inicia su desplazamiento. A diferencia que, otras fuerzas de resistencia actúan en determinadas condiciones de manejo [5]. A bajas velocidades, esta fuerza se considera como la principal resistencia al movimiento (Fig. 2.6).

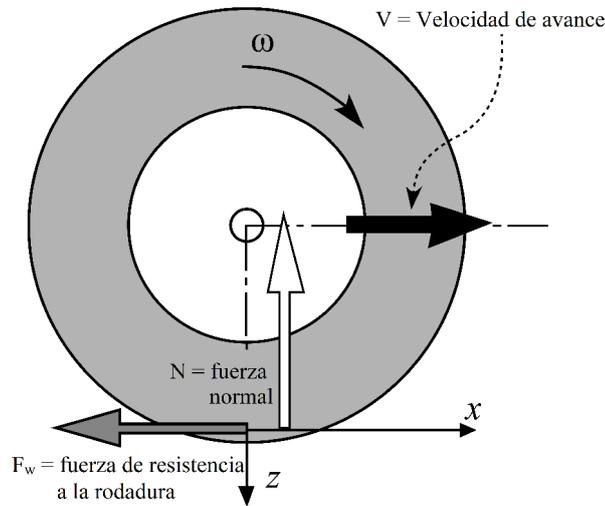


Figura 2.8: Dirección de la fuerza de resistencia a la rodadura [11]

La forma de la expresión para determinar la fuerza de resistencia a la rodadura [10] es

$$F_{rr} = \mu_{rr}mg, \quad (2.6)$$

donde μ_{rr} , es el coeficiente de resistencia a la rodadura (adimensional), m es la masa, y g es la constante de gravedad. Vogel, expone que el factor de resistencia a la rodadura puede estimarse a una constante, y para vehículos eléctricos típicos por debajo de 1500lb de masa, éste valor se aproxima a:

- 0.006 – 0.01: sobre una superficie dura (concreto)
- 0.02: sobre una superficie de dureza media
- 0.30: sobre una superficie blanda (arena)

El cálculo del coeficiente de resistencia a la rodadura, es un estudio más extenso que involucra conocer información del sistema al que el neumático está sometido. Por ejemplo; presión de trabajo, temperatura, velocidad. Además, información sobre la composición del material de fabricación y su geometría.

En la determinación del coeficiente de resistencia a la rodadura, se realiza una linealización mediante graficas de curvaturas, en función de variables que mejor se acoplen al estudio.

En la Figura 2.9, se aprecia el coeficiente de resistencia a la rodadura en función de la velocidad y tipos de neumático utilizado.

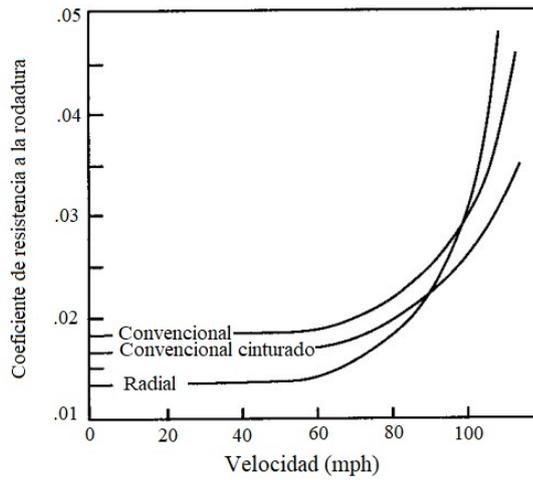


Figura 2.9: Relación de μ_{rr} con velocidad y tipo de neumático [5]

Por otra parte, en la Figura 2.10, se observa el coeficiente de resistencia a la rodadura en función de la presión de inflado del neumático y el tipo de superficie de trabajo.

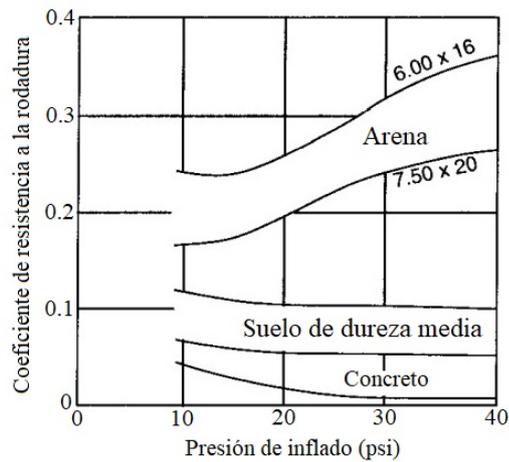


Figura 2.10: Relación de μ_{rr} con presión de inflado y tipo de terreno [5]

2.5.2. Fuerza de arrastre aerodinámico

La fuerza de resistencia aerodinámica es producida por la fricción entre el aire y un objeto en movimiento. Existen dos fuentes principales, la del flujo del aire en el exterior e interior del vehículo. La fuente generada en el exterior es dominante y podría representar más de un 90 % de la resistencia aerodinámica total [12].

Una expresión matemática para representar la fuerza de resistencia aerodinámica [10] se expresa así

$$F_{ad} = \frac{\rho * A * C_d * V^2}{2}, \quad (2.7)$$

en la cual, F_{ad} representa a la fuerza por arrastre aerodinámico, ρ es la densidad del aire, A es la proyección del área frontal del objeto, C_d es el coeficiente aerodinámico y V la velocidad del vehículo.

El coeficiente de arrastre aerodinámico C_d está relacionado con la forma y tipo del vehículo, como se observa en la Figura 2.11.

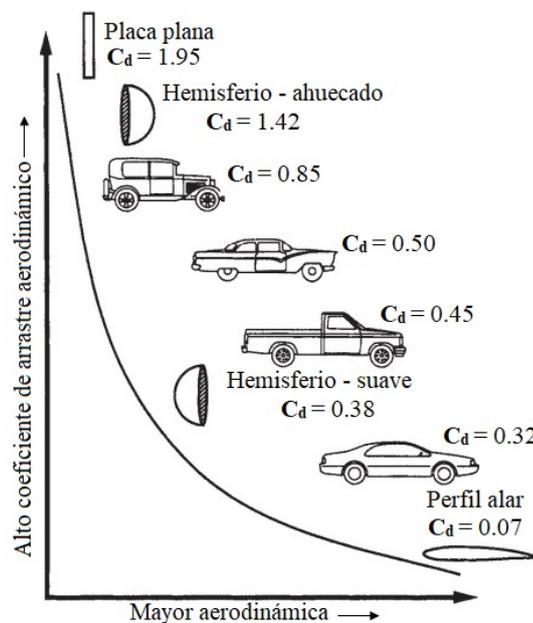


Figura 2.11: Coeficiente aerodinámico y formas típicas de vehículos [3]

Además, el coeficiente C_d se determina implementando un análisis de fluidos computacional CFD, por sus siglas en inglés (Computational Fluid Dynamics). Para el análisis, se requiere un modelo CAD del objeto de estudio, como se aprecia en la Figura 2.12.



Figura 2.12: Modelo CAD de motocicleta.

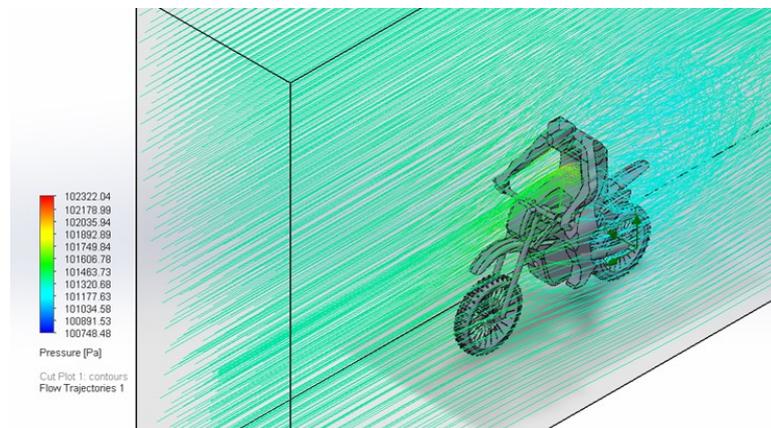


Figura 2.13: Análisis CFD en software Solidworks

Posteriormente, mediante un software de análisis CFD, se realiza el estudio sobre el modelo CAD para la obtención del coeficiente C_d y la fuerza F_{ad} , como se aprecia en la Figura 2.13.

2.5.3. Fuerza de ascenso en pendiente

Es la fuerza necesaria para impulsar el objeto en una pendiente [14] (ver Fig. 2.14) y su expresión matemática es

$$F_{hc} = W \sin \psi, \quad (2.8)$$

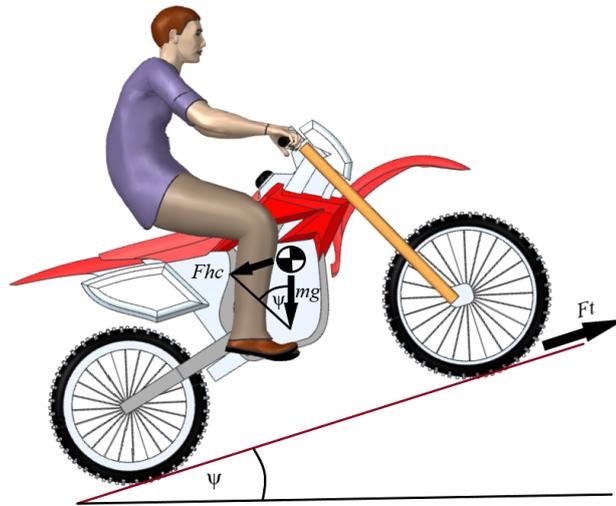


Figura 2.14: Fuerza de ascenso en pendiente F_{hc}

donde F_{hc} representa la fuerza, W es el peso del objeto y ψ es el ángulo de inclinación del terreno.

Existe un término que se relaciona con el ángulo de inclinación, el grado de inclinación del terreno. El grado de inclinación es una relación entre una distancia recorrida horizontalmente ante un ascenso vertical [3] (Fig. 2.15).

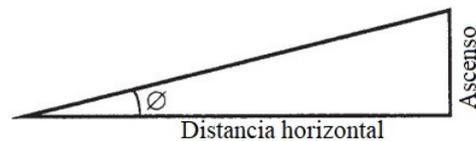


Figura 2.15: Ángulo de inclinación del terreno [3]

El ángulo o grados de inclinación, pueden ser relacionados mediante la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Porcentaje de inclinación y ángulo de inclinación del terreno [3]

Grado de inclinación	Ángulo de inclinación	Función Sin
1 %	0° 34'	0.00989
2 %	1° 9'	0.02007
3 %	1° 43'	0.02996
4 %	2° 17'	0.04013
5 %	2° 52'	0.05001
6 %	3° 26'	0.05989
8 %	4° 34'	0.07062
10 %	5° 43'	0.09961
15 %	8° 32'	0.14838
20 %	11° 19'	0.19623
25 %	14° 2'	0.24249
30 %	16° 42'	0.28736
35 %	19° 17'	0.33024
40 %	21° 48'	0.37137
45 %	24° 14'	0.41045

2.5.3.1. Graduabilidad

El ángulo de inclinación ψ representa la inclinación del terreno durante la maniobra de conducción, a una velocidad constante previamente determinada. Suponer una velocidad constante durante un ascenso en pendiente, eleva considerablemente los requerimientos de potencia [14]. Éste escenario resulta desfavorable si, durante las maniobras de conducción, ya se encuentra la máquina a plena marcha.

Se introduce el termino ψ_{max} para definir una pendiente máxima, que puede superar un vehículo a una velocidad determinada y constante. La ecuación del ángulo ψ_{max} es tomada de [10], su expresión es

$$\psi_{max} = \arcsin\left(\frac{P_m n_t}{Vmg} - \frac{\rho A C_d v^2}{2mg} - u_{rr} - \frac{\gamma_m a}{g}\right), \quad (2.9)$$

donde ψ_{max} es la pendiente máxima del terreno que el vehículo puede superar, n_t es la eficiencia de la transmisión, P_m es la potencia del motor y V es la velocidad del vehículo.

El valor de pendiente máxima superable es sustituible por el de ψ , en la Ecuación 2.8, en el caso de implementar la pendiente máxima superable del vehiculo en el análisis, a una velocidad máxima definida y constante.

2.5.4. Fuerza neta

La fuerza neta se encuentra en función de la aceleración y se la calcula mediante la segunda ley de Newton [10]. El resultado de la fuerza neta representa la aceleración en el sistema. No obstante, el efecto de inercia de componentes giratorios acoplados en la transmisión de potencia dentro del vehículo se ven involucrados. Por tal motivo, se introduce un término γ_m , denominado factor de masa.

La ecuación de la fuerza neta se expresa como

$$F_{net} = \gamma_m m a, \quad (2.10)$$

donde m es la masa y a es la aceleración del objeto.

$$\gamma_m = 1.04 + 0.0025(\epsilon_{Gear} * \epsilon_{Diff})^2 \quad (2.11)$$

Los términos ϵ_{Gear} y ϵ_{Diff} en la Ecuación 4.14 representan una relación de transmisión, de un grupo de engranes o grupo diferencial (respectivamente), dentro de la cadena de transmisión de potencia del vehículo [12].

El término γ_m se relaciona al sistema de transmisión implementado. Además, por el tipo de motor eléctrico. En la Figura 2.16 se observa un motor eléctrico central denominado *mid*, el cual requiere una transmisión por cadena y es equivalente al término ϵ_{Gear} .



Figura 2.16: Motor eléctrico QSMOTOR - 138

En la Figura 2.17 se aprecia un motor eléctrico integrado en la rueda posterior, denominado tipo *hub*. Esta variante presenta una relación de transmisión directa, es decir, no presenta una relación de transmisión. En caso de existir una relación de transmisión mediante un grupo diferencial, será expresado en el término ϵ_{Diff} .



Figura 2.17: Motor eléctrico Enertrac MHM-603

Capítulo 3

Modelo de estimación de potencia eléctrica

En base a la revisión literaria, en este capítulo se propone un modelo para la estimación de potencia mecánica y eléctrica requerida, en un proceso de conversión eléctrica de motocicleta.

3.1. Modelo propuesto

Para determinar la potencia requerida en la conversión eléctrica de motocicleta, es necesario extraer información de las características del vehículo y del entorno de operación, que influyen en la maniobra de conducción y su comportamiento dinámico. La información requerida es de carácter preferencial, mientras que otros datos dependen únicamente del vehículo y ambiente.

En el modelo propuesto (Fig. 3.1), inicialmente se requiere un registro de preferencias del usuario y estilo de conducción, denominado *registro preferencial*. La información corresponde a los siguientes datos:

- Velocidad máxima
- Aceleración
- Inclinación del terreno
- Autonomía

La información que depende de las características propias del vehículo y su ambiente de operación se establece como *Registro de variables*. Los parámetros requeridos son los siguiente:

- Masa de la motocicleta
- Masa del piloto
- Área frontal de la motocicleta
- Temperatura del ambiente
- Densidad del aire
- Radio de la rueda

En el análisis dinámico, se determina las principales fuerzas de oposición al movimiento en base en la información anterior. Este paso es denominado *Estudio dinámico*, y se comprende en la resolución matemática del cálculo de la fuerza de tracción del modelo.

La información del requerimiento de potencia y torque en la conversión eléctrica, se determina mediante cálculo matemático en la sección *determinación de requerimientos*, del modelo propuesto.

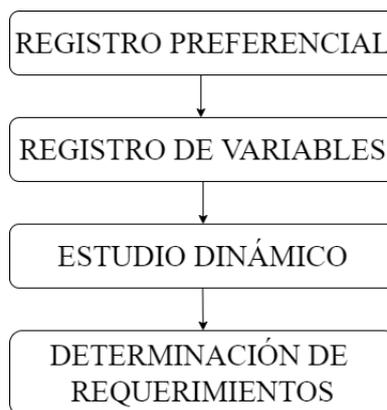


Figura 3.1: Diagrama de modelo propuesto

Durante la aplicación del modelo, se requiere información que forma parte del producto final. Por ejemplo; peso del motor, batería, valores de relación de transmisión, y más datos de

componentes que no están definidos. Por consiguiente, se realiza una proyección de los componentes candidatos en la conversión eléctrica y se aplica una o más reiteraciones al modelo.

3.2. Registro preferencial

Mediante la Tabla 3.1 se registra información preferencial del usuario al modelo para efecto de análisis.

Tabla 3.1: Registro de limitaciones iniciales

Nro.	Parámetro	Valor
1	Velocidad máxima	m/s
2	Aceleración	m/s^2
3	Inclinación del terreno	$\%$
4	Autonomía	h horas

El valor de los parametros se establecen por el operador o usuario, ya que están relacionados con el propósito y modo de conducción del vehículo.

La autonomía propuesta no forma parte del cálculo de potencia requerida, pero se recurre a la información posteriormente como criterio de selección de la fuente de energía o batería eléctrica, durante la implementación real del modelo.

3.3. Registro de variables

En la Tabla 3.2 se registra información no preferencial. Sin embargo, ciertos datos pueden ser optimizados para mejorar el desempeño del vehículo.

Tabla 3.2: Registro de datos de entrada

Nro.	Parámetro	Valor
1	Masa de motocicleta	kg
2	Masa del piloto	kg
3	Área frontal de la motocicleta	m^2
4	Temperatura de ambiente de operación	$^{\circ}C$
5	Densidad del aire	kg/m^3
6	Radio de la rueda	m

3.4. Estudio dinámico

La fuerza de tracción se determina mediante la Ecuación 4.20. Además, el cálculo en la expresión 3.2 se satisface con la información de los registros anteriores y el aporte de recursos literarios, para la extracción de coeficientes o valores numéricos constantes.

$$F_t = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{net} \quad (3.1)$$

$$F_t = (\mu_{rr} * m * g) + \left(\frac{\rho * A * C_d * V^2}{2}\right) + (m * g * \sin \theta) + (\gamma_m * m * a) \quad (3.2)$$

3.5. Determinación de requerimientos

El torque, potencia eléctrica y mecánica se determinan en esta sección. Se utiliza el resultado en la selección de un conjunto eléctrico para la conversión eléctrica.

3.5.1. Torque

Es el torque necesario para impulsar el vehículo a una fuerza de tracción y radio de rueda determinada, su expresión es

$$T = F_t * r, \quad (3.3)$$

donde F_t es la fuerza de tracción y r es el radio del neumático donde existe la transmisión de potencia, medido en *metros*.

3.5.2. Potencia mecánica y eléctrica

La potencia mecánica del sistema puede ser obtenida mediante la Ecuación 3.4 [10], y su expresión es

$$P_m = F_t * V, \quad (3.4)$$

donde P_m es la potencia mecánica del análisis y será igual a la multiplicación de la fuerza de tracción F_t y la velocidad V .

Además, la potencia eléctrica P_e es la necesaria para la selección del motor eléctrico, y su expresión matemática es

$$P_e = P_m / E_m, \quad (3.5)$$

donde la eficiencia del motor eléctrico E_m se obtiene de hojas de datos o reporte de pruebas por parte del fabricante.

Capítulo 4

Implementación y pruebas

En este capítulo se muestra la implementación de carácter experimental de un conjunto eléctrico en una motocicleta, y prueba de conducción para validación del modelo. Se manifiesta un escenario de conducción con estilo recreativo en los registros preferenciales del usuario final. Por lo tanto, no se considera el cambio y afectación del nuevo centro de gravedad, además, de una velocidad, aceleración o autonomía elevada. También, se acuerda no comprometer la estructura, y se expone componentes eléctricos a la interperie, con fin del monitoreo de su funcionamiento durante las pruebas de validación.

Se limita su conducción sobre una superficie plana sobre suelo de tipo arenoso y duro, y de poca inclinación del terreno.

La batería eléctrica se ensambla mediante un proceso experimental. Además, se emplea componentes de transmisión de potencia accesibles en el mercado local, para eliminar costos de fabricación o importación, facilitando tareas de mantenimiento.

4.1. Iteración del modelo

4.1.1. Vehículo donante

El proceso de conversión eléctrica se realiza en una motocicleta marca HONDA modelo CRF450R3 (Fig. 4.1). Todos los componentes de la motorización de serie se extraen para dar cabida al nuevo sistema de propulsión.



Figura 4.1: Motocicleta Honda CRF 450R3

4.1.2. Registro preferencial del usuario

La información se registra en la Tabla 4.1, y corresponde a preferencias del usuario y aplicación de la motocicleta. Se añade un bajo valor en la inclinación del terreno con el propósito de compensar la irregularidad del terreno.

Tabla 4.1: Registro preferencial en la implementación

Parámetro	Valor
Velocidad máxima	15,28m/s
Aceleración	0,6m/s ²
Inclinación del terreno	1 %
Autonomía	0,25 – 0.3h

4.1.3. Registro de variables

La información en la Tabla 4.2 corresponde a datos necesarios para satisfacer la ecuación del cálculo de la fuerza de tracción.

Tabla 4.2: Registro de variables en la implementación

Parámetro	Valor
Masa de la motocicleta	110,4kg
Masa del piloto	80,1kg
Área frontal de la motocicleta	0,814m ²
Temperatura de ambiente de operación	20 °C
Densidad del aire	1.202kg/m ³
Radio de la rueda	0,32m

4.1.3.1. Masa de la motocicleta

En el valor de la masa de la motocicleta (Fig. 4.2) se consolida con el valor de masa de todos los componentes que conforman el prototipo, se considera también el valor de componentes estructurales adicionales.



Figura 4.2: Medicion de masa de la motocicleta

4.1.3.2. Masa del piloto

En la medición de la masa del piloto se considera el uso de una indumentaria deportiva básica de seguridad (Fig. 4.3).



Figura 4.3: Medicion de masa del piloto

4.1.3.3. Área frontal

Para determinar el área frontal del vehículo se desarrolla un modelo CAD de la motocicleta y piloto, en el software de diseño Solidworks mediante una licencia estudiantil. Mediante operaciones de medición en el software, se obtiene el valor del área de la vista frontal del modelo (Fig. 4.4). En el diseño CAD se replica la escala real de la motocicleta y piloto, se aplica a éste un estudio ergonómico de la población latinoamericana [16] (Fig. 4.5).

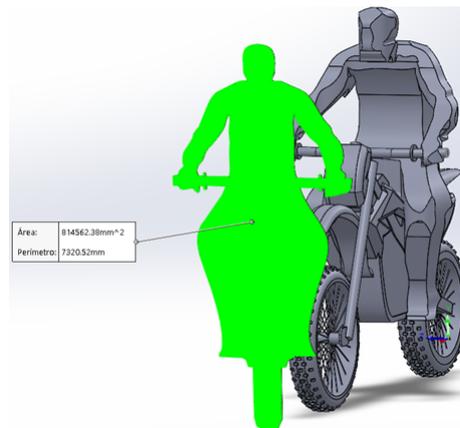


Figura 4.4: Medicion de área frontal de motocicleta y piloto



Figura 4.5: Diseño ergonómico CAD del objeto de estudio.

4.1.3.4. Temperatura de ambiente de operación

La ubicación geográfica para la aplicación del prototipo se establece en la ciudad de Ibarra, provincia de Imbabura. Según información climatológica, la temperatura media observada se encuentra en el rango de 18.1 a 20 °C [15].

La temperatura ambiente de operación se establece en 20 grados centígrados.

4.1.3.5. Densidad del aire

La expresión para obtener el valor de densidad del aire es

$$\rho_{aire} = \frac{P}{RT}, \quad (4.1)$$

donde P es la presión atmosférica del lugar en Pa y R es la constante del gas (aire) en J/KgK , y T es la temperatura en grados *Kelvin*.

Mediante datos climatológicos, se obtiene un valor promedio de $1012hPa$ en la zona de operación, y una constante del aire con un valor de $287,07J/KgK$. Se sustituye los valores en la Ecuación (4.3). Entonces, la densidad del aire es

$$\rho_{aire} = \frac{101200Pa}{(287,07J/KgK)(293,15^{\circ}K)} \quad (4.2)$$

$$\rho_{aire} = 1,202kg/m^3. \quad (4.3)$$

4.1.4. Cálculo de la fuerza de tracción del modelo

La fuerza de tracción es la sumatoria de las fuerzas mas influyentes en oposicion al desplazamiento, como se expone en la Ecuación 4.20. Se procede a calcular cada una de las fuerzas.

4.1.4.1. Cálculo de fuerza de resistencia a la rodadura

Se calcula en base a la Ecuación 2.6. Además, se determina el coeficiente de resistencia a la rodadura μ_{rr} , la masa del objeto m se encuentra definida y el valor de la gravedad propuesta para el estudio es establece en $9,81m/s^2$.

Mediante una linealización en la gráfica de la Figura 2.9, que relaciona el coeficiente de rodadura y la velocidad en tres tipos de neumáticos, se obtiene el valor de μ_{rr} , como se muestra en la Figura 4.6.

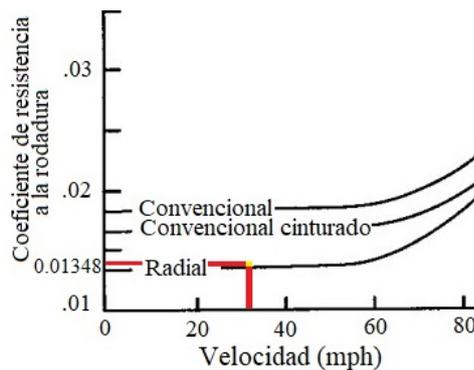


Figura 4.6: Línealización del coeficiente de rodadura por tipo de neumático

Por lo tanto, la fuerza de resistencia a la rodadura es

$$F_{rr} = \mu_{rr}mg \quad (4.4)$$

$$F_{rr} = (0,013489)(190,5kg)(9.81m/s^2) \quad (4.5)$$

$$F_{rr} = 24,97N. \quad (4.6)$$

4.1.4.2. Cálculo de fuerza de arrastre aerodinámico

Para el cálculo del arrastre aerodinámico se implementa la Ecuación 2.7. Inicialmente, se realiza un análisis CFD y determina el valor del coeficiente aerodinámico C_d mediante la información registrada en la Tabla 4.2.

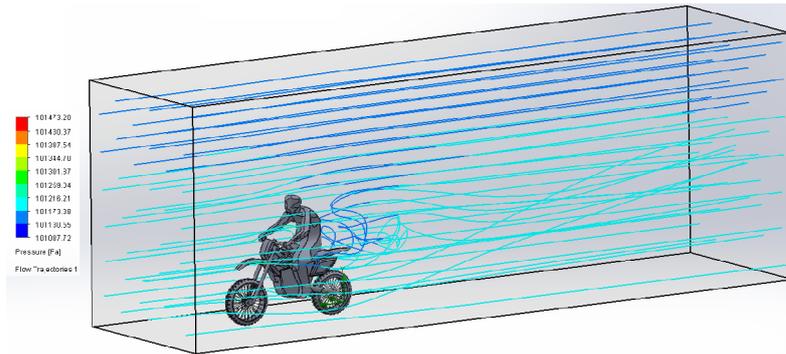


Figura 4.7: Análisis CFD del objeto de estudio

El valor del coeficiente aerodinámico resulta en

$$C_d = 0,665, \quad (4.7)$$

además, se reemplaza información de la Tabla 4.2 y el valor de C_d en la Ecuación 4.10, y se obtiene la fuerza de arrastre aerodinámico con un valor de

$$F_{ad} = \frac{\rho * A * C_d * V^2}{2} \quad (4.8)$$

$$F_{ad} = \frac{1.202 \text{kg/m}^3 * 0.814 \text{m}^2 * 0,665 * (15,28 \text{m/s})^2}{2} \quad (4.9)$$

$$F_{ad} = 75,97 \text{N}. \quad (4.10)$$

4.1.4.3. Cálculo de fuerza de ascenso en pendiente

La fuerza de ascenso en pendiente se determina implementando la Ecuación 2.8. Mediante la Tabla 2.1, el valor de ψ en una inclinación del terreno de 1%. es de 0,00989. Por lo tanto, el valor de la fuerza es de

$$F_{hc} = m * g * \sin \psi \quad (4.11)$$

$$F_{hc} = 190,5kg * 9.81m/s^2 * 0,004945 \quad (4.12)$$

$$F_{hc} = 9,24N. \quad (4.13)$$

4.1.4.4. Cálculo de fuerza neta

El valor de la fuerza es calculado mediante la Ecuación 2.10, en la cual, la expresión del término de γ_m es

$$\gamma_m = 1.04 + 0.0025(\varepsilon_{Gear} * \varepsilon_{Diff})^2. \quad (4.14)$$

El término de ε_{Gear} representa la relación de transmisión por cadena implementada en el prototipo. Al no existir un grupo diferencial, el término ε_{Diff} se iguala a 1. Sustituyendo los valores con la ecuación el resultado de la fuerza es

$$\gamma_m = 1.04 + 0.0025 * (4,1538 * 1)^2 \quad (4.15)$$

$$F_{net} = (1.04 + 0.0025 * (4,1538 * 1)^2) * 190,5[kg] * 0,6[m/s^2] \quad (4.16)$$

$$F_{net} = 123,8N. \quad (4.17)$$

4.1.4.5. Fuerza total de tracción

La sumatoria de todas las fuerzas de imposición al movimiento es igual a la fuerza total de tracción. Sustituyendo el valor de cada fuerza en la Ecuación 4.18, el valor de la fuerza de tracción es

$$F_t = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{net} \quad (4.18)$$

$$F_t = (24,97 + 75,97 + 9,24 + 123,8)N \quad (4.19)$$

$$F_t = 233,98N. \quad (4.20)$$

4.1.5. Cálculo de torque y potencia

4.1.5.1. Torque necesario

Es el torque requerido en el elemento final de la transmisión de potencia, se calcula mediante la Ecuación 3.3. Donde r es el radio del neumático y medido en *metros*. El valor del torque es

$$T = F_t * r \quad (4.21)$$

$$T = 233,98N * 0,32m \quad (4.22)$$

$$T = 74,87Nm. \quad (4.23)$$

4.1.5.2. Potencia mecánica del sistema

Se recurre a la Ecuación 3.4 para la obtención de la potencia mecánica del análisis dinámico. La expresión matemática relaciona la fuerza total de tracción y la velocidad del vehículo,

entonces, el valor de potencia mecánica es

$$P_m = F_t * V \quad (4.24)$$

$$P_m = 233,98N * 15,28m/s \quad (4.25)$$

$$P_m = 3575,21W, \quad (4.26)$$

por lo tanto la potencia mecánica en caballos de fuerza es

$$P_{mHP} = 4,794HP. \quad (4.27)$$

4.1.5.3. Potencia eléctrica requerida

La potencia eléctrica es la requerida por el motor eléctrico, además, se determina mediante la Ecuación 3.5. Por lo tanto, sustituyendo el valor de potencia mecánica y eficiencia del motor eléctrico, el resultado es

$$P_e = P_m / E_m \quad (4.28)$$

$$P_e = 3575,21W / 0.83 \quad (4.29)$$

$$P_e = 4307,48W, \quad (4.30)$$

donde E_m es la eficiencia del motor eléctrico (ver Anexo A).

4.2. Implementación práctica

4.2.1. Selección de motor eléctrico

Se obtienen tres alternativas mediante un proceso de búsqueda (Tabla 4.3) y la adquisición se enfoca en equipos de corriente directa DC. Debido al costo económico que representa un sistema de corriente alterna AC [3].

4.2.1.1. Cuadro de alternativas

Se evalúa las alternativas mediante criterios de selección, los criterios son ponderados según su importancia en el proyecto a través de un proceso analítico jerárquico (AHP) (ver Anexo B).

- Cuadro de alternativas:

Tabla 4.3: Alternativas de selección de motor eléctrico

Tabla 4.3	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Imagen			
Marca	QS-MOTORS	GOLDEN	ENERTRAC
Modelo	138-70H	HPM5000L	MHM-603
Procedencia	<i>China</i>	<i>China</i>	<i>Americana</i>
Tipo	Brushless IPM PMSM	BLDC PM	BLDC PM
Potencia Nominal	3KW	5KW	10KW
Potencia máxima	12KW	7.5KW	20KW
Torque máximo	51Nm@1 : 2.35	40Nm	390Nm
Velocidad máxima	2500rpm	4200rpm	7RPM/Volt
Voltaje	72Vdc	72Vdc	120-144Vdc
Eficiencia	85 – 91.6%	86-91.4%	–
Categoría	<i>mid</i>	<i>mid</i>	<i>hub</i>
Sensorica	<i>Sensores Hall</i>	<i>Sensores Hall</i>	<i>Sensores Hall</i>
Sensor Temperatura	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>
Corriente máxima	150A	160A	200A
Refrigeración	<i>Aire</i>	<i>Liquida</i>	<i>Aire</i>
Transmisión	<i>Sprocket 428 - 520</i>	<i>Plain bore sprocket</i>	<i>Directa</i>
Masa	12.5Kg	11.35Kg	-
Número de fases	3	3	3
Precio	310\$	446\$	1295\$

4.2.1.2. Criterios de selección

Se considera como criterios de selección más influyentes en el presente proyecto de conversión los siguientes:

- Precio

Se comprende el poder adquisitivo como consideración importante para el proyecto, dependiendo de las características requeridas del motor eléctrico, este puede elevar considerablemente su precio.

- Potencia

Este criterio responde a los requerimientos de potencia del modelo analizado. No obstante, se considera el rango de potencia nomina, máxima y pico que puede trabajar el motor eléctrico durante la selección.

- Torque

Se emplea el criterio para la selección de un motor eléctrico capaz de ejercer el torque necesario para el desplazamiento del vehículo.

- Tensión de trabajo

El Voltaje o tensión se relaciona al factor económico, como en la adquisición de componentes principales como *batería eléctrica* y *cargador*, entre otros dispositivos. Además, se relaciona el criterio con la compatibilidad de los demás componentes del conjunto eléctrico.

- Eficiencia

El valor de la eficiencia del motor eléctrico se obtiene mediante información proporcionada por el fabricante o proveedor.

Dependiendo de la potencia de trabajo, se emplea un valor determinado de eficiencia en porcentaje para el cálculo de la potencia requerida.

- Aporte de masa

Según la categoría que presente el motor eléctrico (*central* o tipo *hub*), se incrementa el valor de *masa suspendida* o *masa no suspendida*.

El motor central se ubica en la parte superior a la suspensión, mientras que el tipo *hub* se integra en la rueda (frontal o posterior) y forma parte de la *masa no suspendida*, esto representa un aumento considerable de peso en la rueda durante la conducción.

- Geometría

Criterio muy importante al trabajar en una plataforma pequeña (motocicleta) debido al espacio reducido. Además, cualquier optimización representa diferencias en el cálculo y promueve una mejora en el desempeño del vehículo. Se implementa herramientas CAD (Fig. 4.8) para proyección del espacio disponible en el diseño de la batería eléctrica y otros componentes.

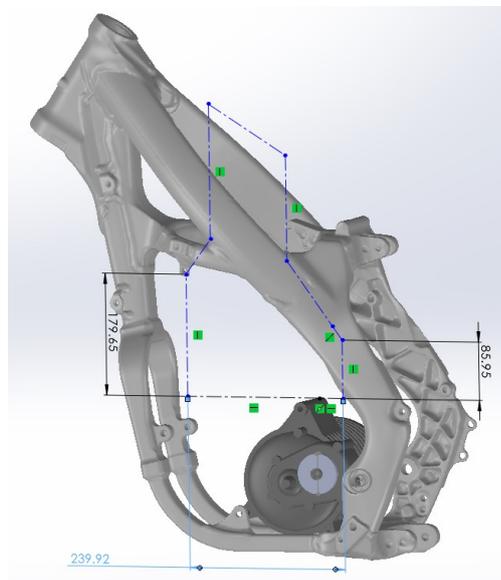


Figura 4.8: Proyección del espacio disponible en alternativa 1

- Adaptabilidad

Se emplean diferentes consideraciones durante el acoplamiento del motor eléctrico en la estructura de la motocicleta.

Las consideraciones principales en el acople motor eléctrico central son:

- Alineación de cadena de transmisión
- Diámetro exterior máximo permisible de la catalina
- Distancia del piñon motriz al centro de rotación del basculante

En cambio, en el acoplamiento de un motor eléctrico tipo *hub* integrado a la rueda, las consideraciones son:

- Alineación de la rueda
- Alineación del disco de freno
- Sujeción del estator y basculante
- Balanceo de motor eléctrico y aro

■ Sensorica

El motor eléctrico se constituye de sensores de temperatura, par, velocidad o posición [17]. Para su control, se emplea un encoder con sensores tipo *Hall* o se trabaja con una modulación de *seno coseno*. Este sistema se compatibiliza con la unidad de control (controlador).

■ Corriente máxima

La cantidad de corriente eléctrica se considera en la selección del calibre de los conductores y en el dimensionamiento de la batería eléctrica.

4.2.1.3. Selección de alternativa

Mediante la ponderación de criterios (Tabla. 4.4) se determina la alternativa más conveniente en el proceso de conversión eléctrica. Además, se implementa una matriz de evaluación PUGH (Tabla 4.5) para su calificación.

Tabla 4.4: Ponderación de criterios de motor eléctrico

Criterio	Valor (%)
Geometría	18 %
Precio	17 %
Adaptabilidad	16 %
Tensión de trabajo	12 %
Potencia	11 %
Aporte de masa	8 %
Corriente máxima	7 %
Torque	6 %
Eficiencia	2 %
Sensorica	2 %
<i>Total</i>	100 %

Tabla 4.5: Selección de alternativa de motor eléctrico

CRITERIO	%	A1		A2		A3	
		VALOR	PESO	VALOR	PESO	VALOR	PESO
GEOMETRÍA	18 %	3	0.54	2	0.36	5	0.9
PRECIO	17 %	5	0.85	4	0.68	2	0.34
ADAPT.	16 %	5	0.8	1	0.16	3	0.48
TENSIÓN	12 %	4	0.48	4	0.48	1	0.12
POTENCIA	11 %	1	0.11	4	0.44	5	0.55
A. DE MASA	8 %	5	0.4	4	0.32	2	0.16
CORRIENTE	7 %	3	0.21	3	0.21	4	0.28
TORQUE	6 %	3	0.18	4	0.24	5	0.3
EFICIENCIA	2 %	4	0.08	3	0.06	4	0.08
SENSORICA	2 %	5	0.1	5	0.1	5	0.1
		TOTAL	3.75	TOTAL	3.05	TOTAL	3.31

La alternativa de calificación más alta es la número 1 y corresponde al motor $Qs138 - 70H$ de la Figura 4.9. Se manifiesta que su potencia nominal es inferior a la requerida, sin embargo, la alternativa presenta una mejor valoración ante otros criterios de mayor ponderación. Para propósitos del proyecto se implementa el equipo sin exceder del rango de potencia máxima.

4.2.2. Selección de controlador

El controlador es selecciona según parámetros del motor eléctrico. Las principales características en que se requiere la compatibilidad se exponen en la Tabla 4.11.



Figura 4.9: Motor QS138-70H

Tabla 4.6: Parametros de selección del controlador

Parámetro	Detalle
Voltaje	72V
Corriente Max.	150A
Sensorica	<i>Sensor Hall</i>
Número de fases	3
Configurable	<i>SI</i>

Por lo tanto, se selecciona el controlador de marca *Votol* y modelo *EM200/2* (Fig. 4.10). Algunos de los parámetros compatibles se observan en la Figura 4.11.



Figura 4.10: Controlador Votol EM200/2.

CARACTERÍSTICAS 技术参数			
Nombre de Serie 系列名称	48~60V	72V	96V
Peso 重量	3800g	3800g	3800g
Corriente Nominal 额定电流	200A	200A	150A
Corriente Instantanea 电流	245A	245A	180A
Corriente Pico 峰值电流	550A	550A	420A
Potencia Máxima 峰值功率	14700W	17640W	23520W
Eficiencia Máxima 最大效率	≤92%		
Protección IP 防护等级	IP67		

Figura 4.11: Características publicitarias Votol EM200/2

4.2.3. Selección de batería eléctrica

Para el desarrollo de la fuente de energía se implementa tecnología de *litio*, debido a que actualmente es la tecnología más utilizada en movilidad eléctrica y otros sistemas de energía. También, por la alta densidad energética y capacidad de carga y descarga que presentan [18].

Es por definición, que baterías de tecnología tradicional implementadas para el arranque en vehículos a combustión no se considera, debido a su baja capacidad de descarga y peso.

la batería eléctrica se diseña mediante parametros de funcionamiento específicos, por tal motivo, se presenta la necesidad de ensamblarla de forma personalizada.

4.2.3.1. Criterios de selección

Los criterios más relevantes en consideración para el ensamble son:

- Tensión nominal

Es el voltaje medido en voltios (*V*), este criterio se utiliza para definir el número de baterías o células en caso de elevar la tensión mediante una conexión en *serie*.

- Capacidad nominal

La capacidad de forma general es medida en *amperios hora* o *Ah* y representa la cantidad de amperios que puede ofrecer la batería en el transcurso de una hora [18]. En caso de elevar la capacidad se recurre a una conexión en *paralelo*.

- Tamaño

Debido a restricciones de espacio, se considera importante el tamaño disponible para la batería. Su geometría se adecúa de mejor forma al espacio disponible.

- Descarga máxima

Es la cantidad máxima de amperios (*A*) que permite descargar la batería a una temperatura específica. El valor de descarga máxima es descrito en la hoja de datos del producto.

- Temperatura de trabajo

Es el rango de temperatura de operación emitido en la hoja de datos del producto. Se considera el criterio por seguridad, ya que las baterías de tecnología de litio no soportan altas temperaturas. Además, presentan riesgo de incendio o explosión al exceder sus capacidades o maltrato [18]. Por tal motivo, se implementa un sistema de control mediante un dispositivo BMS (*sistema de gestión de batería*). Capas de monitorear la temperatura, voltaje y descarga de corriente.

- Precio

Debido al alto coste que presenta la tecnología de *litio* [18], se evalúa este criterio para una correcta selección de celdas de batería.

- Tipo de batería eléctrica

Corresponde a la clasificación de baterías dentro de la tecnología a base de litio.

- Disponibilidad

Comprende del stock de inventario del proveedor para el cumplimiento de la planificación del presente proyecto.

Mediante un análisis de ponderación de criterios (ver Anexo C) se obtiene como resultado su valoración, como se observa en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Ponderación de criterios de batería eléctrica

Criterio	Valor %
Disponibilidad	29%
Tamaño	20%
Capacidad	15%
Descarga Max.	12%
Voltaje	7%
Tipo	7%
Precio	6%
Temp. Opera.	4%
<i>Total</i>	100%

4.2.3.2. Cuadro de alternativas

Mediante una búsqueda se obtiene tres resultados (Tabla 4.8), y para todas las alternativas se requiere importación.

Tabla 4.8: Alternativas de selección de batería eléctrica

Tabla 4.8	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Imagen			
Marca	BAK	MOLICEL	LG
Modelo	N21700CG	IRN P42A	CHEM JH3
Procedencia	<i>China</i>	<i>China</i>	<i>China</i>
Tipo	Li-Ion	Li-Ion	Lifepo4
Voltaje nominal	3.6	3.6	3.2
Capacidad	5000mah	4200mah	63Ah
Descarga máxima	3C (@ 25 °C)	42A	8C
Tamaño	21700	21700	(14x185x263)mm
Temp. máx.	60°C	60°C	60°C
Precio	5.44\$	5.86\$	37.5\$
Masa	≤ 70g	70g	1,282kg
Proveedor	Liionwholesale	Liionwholesale	Aliexpress
Disponibilidad	<i>stock-inmediato</i>	<i>tiempo de espera</i>	<i>tiempo de espera</i>

4.2.3.3. Selección de alternativa

A través de una evaluación de alternativas con criterios ponderados (Tabla 4.9) se obtiene como resultado que la alternativa 1 presenta una mejor tentativa de solución.

Tabla 4.9: Matriz de selección de batería eléctrica

CRITERIO	%	A1		A2		A3	
		VALOR	PESO	VALOR	PESO	VALOR	PESO
DISP.	29 %	5	1.45	1	0.29	1	0.29
TAMAÑO	20 %	4	0.8	4	0.8	5	1
CAPACIDAD	15 %	4	0.6	3	0.45	5	0.75
DESC. MAX.	12 %	2	0.24	4	0.48	5	0.6
VOLTAJE	7 %	5	0.35	5	0.35	4	0.28
TIPO	7 %	2	0.14	2	0.14	5	0.35
PRECIO	6 %	3	0.18	3	0.18	5	0.3
TEMP. OP.	4 %	5	0.2	5	0.2	5	0.2
		TOTAL	3.96	TOTAL	2.89	TOTAL	3.77

4.2.4. Selección de componentes adicionales

4.2.4.1. Mecánicos

Debido a la implementación de un motor eléctrico de tipo central, se requiere emplear un sistema de transmisión por cadena, que además, comprende de:

- Rueda dentada conductora
- Cadena de transmisión
- Rueda dentada conducida

La relación de transmisión brinda la capacidad de multiplicar o dividir torque o velocidad, según se requiera. La forma de la expresión para determinar la relación de transmisión es

$$R_t = \frac{Z_2}{Z_1}, \quad (4.31)$$

donde R_f es la relación de transmisión, Z_2 es el número de dientes del elemento de salida (catalina) y Z_1 el número de dientes del elemento de entrada (piñon).

Primero, se selecciona la relación de transmisión en base al torque requerido. Por tal motivo, se recurre a la hoja de desempeño del motor eléctrico proporcionada por el fabricante, donde se puede visualizar el comportamiento de torque y velocidad del motor, entre otros indicadores (Fig. 4.12).

电机测试报告

客户名称(Customer): 2 额定电压(Voltage): 6
 产品名称(ProductName): 3 额定功率(Power rated): 7
 电机型号(Type): 4 测试人员(Tester): 8
 电机编号(Number): 202009070002 测试日期(Test Date): 2020.09.07

序号	电压 V	电流 A	输入功率 W	转矩 N.m	转速 rpm	输出功率 W	效率 %	时间 S
1	72.22	21.07	1522	1.0	2942.2	308.0	20.2	0.000
2	72.22	20.93	1512	1.0	2945.1	308.4	20.4	2.823
3	72.23	21.44	1549	1.0	2941.7	308.0	19.9	4.633
4	72.23	21.72	1569	1.1	2942.6	338.9	21.6	6.442
5	72.22	21.99	1588	1.0	2942.6	308.1	19.4	8.252
6	72.22	22.18	1602	1.1	2942.2	338.9	21.2	10.06
7	72.22	21.92	1583	1.5	2944.4	462.4	29.2	11.87
8	72.21	23.07	1666	1.4	2941.8	431.2	25.9	13.68
9	72.21	23.10	1668	1.5	2938.8	461.5	27.7	15.49
10	72.20	23.89	1725	1.7	2938.1	523.0	30.3	17.30
11	72.19	25.57	1846	2.0	2940.8	615.8	33.4	19.11
12	72.19	25.38	1832	2.3	2935.7	706.9	38.6	20.92
13	72.16	28.58	2062	3.0	2929.0	920.0	44.6	22.73
14	72.14	31.35	2261	3.5	2931.0	1074	47.5	24.54
15	72.11	35.08	2530	4.7	2925.5	1440	56.9	26.35
16	72.06	40.16	2894	5.7	2925.3	1746	60.3	28.16
17	72.02	45.05	3244	6.7	2920.4	2049	63.1	29.97
18	71.97	51.23	3687	8.5	2919.5	2598	70.5	31.78
19	71.92	57.36	4125	9.5	2918.6	2904	70.4	33.59
20	71.87	63.79	4585	11.1	2917.1	3390	73.9	35.40
21	71.82	68.88	4947	12.7	2915.1	3876	78.4	37.21
22	71.75	76.50	5489	14.0	2910.9	4267	77.7	39.02
23	71.68	84.18	6034	15.3	2908.0	4658	77.2	40.83
24	71.60	93.14	6670	17.2	2907.5	5236	78.5	42.64
25	71.52	103.4	7394	19.1	2904.9	5809	78.6	44.44
26	71.44	112.7	8051	21.2	2903.5	6445	80.0	46.25
27	71.36	122.0	8709	23.6	2897.4	7159	82.2	48.06
28	71.26	133.2	9492	26.0	2891.2	7870	82.9	49.87
29	71.16	144.7	10297	28.3	2877.8	8528	82.8	51.68
30	71.13	147.0	10456	31.6	2721.4	9004	86.1	53.49

Figura 4.12: Reporte de desempeño del motor Qs138-70H

Mediante el reporte de la Tabla 4.12, se evalúa al motor en base a su torque entre el registro no. 24 al 25, simultaneamente se considera que la gama de piñones comerciables para el eje del motor es de 13 hasta 16 dientes (de paso nro. 428) y de la rueda conducida original de la motocicleta es desde 41 a 54 dientes.

Se determina el valor más alto de la relación de transmisión con las ruedas dentadas disponibles, para aprovechar la entrega de torque a costa del elevado regimen de giro como se manifiesta en el registro seleccionado. Debido a que se requiere solo 455,91rpm para alcanzar los 15,28m/s de velocidad final del vehículo con un radio de rueda de 0.32m según la Tabla 4.1. En base a la expresión 4.31, la relación de transmisión es

$$R_t = \frac{54}{13} \quad (4.32)$$

$$R_t = 4,154. \quad (4.33)$$

Se divide el valor del torque requerido en la expresión 4.23 entre el valor de la relación de transmisión en la expresión 4.33. Así, el torque necesario en la flecha del motor es

$$T = \frac{74,87Nm}{4.154} \quad (4.34)$$

$$T = 18,02Nm. \quad (4.35)$$

El resultado del torque en la expresión 4.35 corresponde a un valor de torque dentro del rango seleccionado (Tabla 4.12). Por lo tanto, se elige una rueda conductora de 13 dientes y una rueda conducida de 54 dientes.

Dado que la velocidad de rotación de la flecha del motor para el registro seleccionado es mayor, se calcula la velocidad máxima teórica en *kilometros por hora* que alcanza el vehículo. Sin embargo, la potencia eléctrica suministrada al motor eléctrico y la potencia mecánica de salida se incrementan.

Mediante una interpolación lineal entre el registro 24 y 25, la velocidad de rotación del piñón motriz se establece en 2905.75rpm. La Ecuación 4.36 [19] se utiliza para determinar la velocidad lineal máxima del vehículo, su expresión es

$$V_{max} = \omega_{max}R, \quad (4.36)$$

donde V_{max} es la velocidad máxima lineal en *metros por segundo*, ω_{max} es la velocidad máxima de rotación en *rpm* y R es el radio del neumático en *metros*. La velocidad lineal máxima teórica es

$$V_{max} = \left(\frac{2\pi(2905.75.26/4,154)}{60} \right) * 0.32 \quad (4.37)$$

$$V_{max} = 23,44m/s, \quad (4.38)$$

en kilometros por hora es

$$V_{max} = 84,39km/h. \quad (4.39)$$

Se implementa el grupo de ruedas dentadas que se observa en la Fig. 4.13 y 4.14.



Figura 4.13: Piñon 13T-428, QsMotor



Figura 4.14: Catalina Scorpion 54T-6H-428

Para la selección de la cadena de transmisión se requiere conocer la potencia a la que va a estar sometida y un factor de servicio [23]. En la Figura 4.15 se observa el factor de servicio para un motor eléctrico y una carga de trabajo uniforme igual a 1.

Aplicación del servicio de factor (F_s)		Tipo de motor principal		
Clasificación de carga	Equipo accionado	Motor eléctrico o turbina	Motor ICE >6 cilindros, (volante de inercia o acoplamiento hidráulico)	Motor ICE < 6 cilindros, (sin acople)
Uniforme (U)	Agitadores; sopladores centrifugos; generadores, bombas centrifugas; transportador de cinta con carga uniforme, transportadores de cadena con carga ligera	1.0	1.0	1.2
Moderada (M)	Compresores centrifugos.; hornos y secadores; transportadores y elevadores con fluctuaciones intermitentes de carga media; secadores; pulverizadores; maquinaria con cargas pulsantes moderadas	1.3	1.2	1.4
Pesada (H)	Prensas, equipos de construcción y de minería; maquinaria, (compresores, alimentadores, plataformas de pozos petrolíferos), maquinaria con fuertes pares de carga o de inversión de torque	1.5	1.4	1.7 - 1.9

Figura 4.15: Factor de servicio F_a [23]

La expresión de la potencia de diseño [23], para la selección de la cadena es

$$P_d = P * F_a, \quad (4.40)$$

donde P_d es la potencia de diseño, P es la potencia de trabajo y F_a es el factor de servicio. Entonces, la potencia de diseño es

$$P_d = 4307,48W * 1 \quad (4.41)$$

$$P_d = 4307,48W. \quad (4.42)$$

La potencia de diseño es igual a la requerida por el motor, además, se requiere la velocidad de rotación de la rueda motriz mediante la Ecuación 4.43 [23]. Su expresión es

$$i = \frac{n_1}{n_2}, \quad (4.43)$$

donde i es la relación de transmisión, n_1 es la velocidad de rotación del elemento motriz y n_2 es la velocidad de rotación del elemento conducido. Entonces, la velocidad de rotación de la rueda motriz es

$$n_1 = i * n_2 \quad (4.44)$$

$$n_1 = 4,154 * 455,91rpm \quad (4.45)$$

$$n_1 = 1893,85rpm. \quad (4.46)$$

Por lo tanto, según la Figura 4.16 se observa que la cadena de estándar europeo *BN/DIN* clase 08B – 1 soporta hasta 5,14Kw de potencia, a un régimen de 1800rpm con un número de 13 dientes en la rueda motriz.

08B-1; (12.70 mm Pitch) power ratings in kilowatt (European standard)																	
Nro. dientes	Diám. círculo primitivo	rpm de la rueda dentada pequeña (rueda rápida)															
		Z	mm	25	50	75	100	200	400	500	750	1 000	1 200	1 440	1 800	2 000	2 250
13	53,07	0,16	0,24	0,43	0,59	0,82	1,55	2,18	3,24	4,06	4,14	4,56	5,14	6,59	5,33	3,34	2,39
15	61,08	0,18	0,28	0,45	0,62	0,96	1,80	2,32	3,44	4,31	4,84	5,28	6,38	6,99	5,64	4,14	2,97
17	69,12	0,22	0,32	0,56	0,76	1,10	2,06	2,84	4,22	5,28	5,53	5,94	7,69	8,59	6,93	5,00	3,57
19	77,16	0,25	0,36	0,65	0,89	1,25	2,33	3,31	4,91	6,15	6,24	6,91	9,01	9,99	8,06	5,90	4,22
21	85,21	0,27	0,39	0,71	0,98	1,39	2,60	3,64	5,41	6,77	6,96	7,60	10,04	10,99	8,87	6,86	4,91
23	93,27	0,30	0,43	0,78	1,06	1,52	2,85	3,97	5,89	7,37	7,67	8,29	11,07	11,99	9,68	7,86	5,62
25	101,33	0,32	0,48	0,84	1,15	1,67	3,12	4,30	6,39	7,99	8,39	8,98	12,10	12,99	10,49	8,93	6,38
Método de lubricación			Tipo 1					Tipo 2					Tipo 3				

Figura 4.16: Selección de cadena de transmisión mediante catálogo SKF [23]

Se selecciona la cadena de transmisión de la Figura 4.17, de marca *Usa Roller Chain* y modelo 08B, que cumple el estándar europeo BS/DIN. La cadena soporta la potencia de 4307,78KW y utiliza el sistema de paso 428 (0.500”).



Figura 4.17: Cadena 08B-01, USA Roller Chain

4.2.4.2. Eléctricos y Electromecánicos

- BMS

Debido al riesgo de las baterías de litio ante el incremento de temperatura se implementa un gestor de batería de marca *Daly* (Fig. 4.18). Además, es compatible con la tecnología Ion-litio de la batería y tensión de trabajo de 72V a una corriente máxima de 150A.



Figura 4.18: BMS Daly modelo Smart li-ion 72V 20s 150A

- Relay

Para el control del paso de energía se incluye un dispositivo Relay (Fig. 4.19) de marca *Noco* y modelo *ZJ200D*. Que cumple las características necesarias para la implementación, como se aprecia en la Tabla 4.10. Para su funcionamiento se requiere una fuente aislada de energía de .



Figura 4.19: Relay Noco ZJ200D

Tabla 4.10: Características principales Relay ZJ200D

Parametro	Detalle
Voltaje de operación	72Vdc
Voltaje máximo	80Vdc
Voltaje de bobina	12Vdc
Potencia de la bobina	5W
Corriente máxima	200A
Temp. máx. op.	65°C

- Conversor DC-DC

Para efecto de activación del relay de la Figura 4.19 se requiere una tensión de $12V_{dc}$. Por tal motivo, se implementa un Conversor DC-DC modelo *RSD – 60H12* y marca *Mean Well* (Fig. 4.20). Las características principales del conversor se observan en la Tabla 4.11.



Figura 4.20: Conversor Mean Well DC-DC *RSD-60H-12*

Tabla 4.11: Características principales conversor DC-DC

Parametro	Detalle
Voltaje de entrada	$40 - 160V_{dc}$
Corriente de entrada	$1.8A$
Voltaje de salida	$12V_{dc}$
Corriente de salida	$5A$
Temp. máx. op.	$70^{\circ}C$
Potencia	$60W$

- Conductor eléctrico principal

Se calcula el área de la sección del conductor eléctrico principal para un sistema monofásico de corriente directa implementando la Ecuación 4.47 [21]. Su expresión es

$$S = \frac{2PL}{\gamma eU}, \quad (4.47)$$

donde S es la sección del cable, P es la potencia prevista en la línea en *vatios*, L es la longitud de canalización en *metros*, γ es la conductividad o inverso de la resistividad del material, e es la caída de tensión en *voltios* y U es la tensión nominal en la línea.

La conductividad eléctrica del cobre γ a una temperatura de 20°C es de $56\text{m}/\Omega\text{mm}^2$. El límite de la caída de tensión en circuitos de fuerza es del 5% [21]. Sin embargo, se considera un escenario de un 0,2% [22] a una potencia máxima de 10456W , con una tensión de 72V y 150A de corriente máxima (Tabla 4.12). La longitud del conductor se establece en $1,17\text{m}$, por lo tanto la sección del conductor es

$$S = \frac{2 * 10456\text{W} * 1,17\text{m}}{56\text{m}/\Omega\text{mm}^2 * (72\text{V} * 0,2\%) * 72\text{V}} \quad (4.48)$$

$$S = 42,14\text{mm}^2. \quad (4.49)$$

Se aplica un factor de seguridad de 1,25 y la sección final del conductor es

$$S_{fs} = 42,14\text{mm}^2 * 1,25 \quad (4.50)$$

$$S_{fs} = 52,67\text{mm}^2. \quad (4.51)$$

El conductor eléctrico corresponde a la marca Electrocable [24], como se observa en la Figura 4.21. Se utiliza en las líneas principales de alimentación de la batería al controlador y relay. El conductor eléctrico es del tipo *Ultraflex*, con numeración AWG 1/0 y sección transversal de $53,49\text{mm}^2$ (Fig. 4.22).



Figura 4.21: Cable conductor Ultraflex AWG 1/0

CONDUCTOR		Diametro de hilo D1	Espesor de Aislamiento (mm)	Espesor de Chaqueta (mm)	Peso total Aprox. (kg/km)	*Capacidad de Corriente (A)			
CALIBRE (AWG o kcmil)	Sección Transversal (mm ²)					En ducto enterrado**		Al aire libre***	
						Plana	Triplexado	Plana	Triplexado
FORMACIÓN CABLEADO FLEXIBLE									
14	2,08	0,300	0,70	0,90	41,14	39	33	38	30
12	3,31	0,300	0,70	0,90	55,21	51	43	50	40
10	5,26	0,400	0,70	0,90	76,45	65	54	66	52
8	8,367	0,400	0,70	1,00	117,49	84	69	86	70
6	13,30	0,400	0,70	1,00	170,14	107	88	114	91
4	21,15	0,400	0,90	1,00	257,63	138	114	154	123
2	33,62	0,400	0,90	1,10	391,95	176	148	206	165
1/0	53,49	0,400	1,00	1,20	605,12	222	186	271	218
2/0	67,44	0,400	1,10	1,20	747,85	254	216	319	257
3/0	85,02	0,400	1,10	1,20	922,97	292	247	374	305
4/0	107,2	0,400	1,20	1,30	1154,31	332	280	439	354
250	126,7	0,400	1,20	1,30	1346,59	364	308	489	396
350	177,4	0,400	1,60	1,40	1883,81	435	371	606	493
500	253,4	0,400	1,70	1,50	2644,93	534	456	772	627
750	380	0,400	2,00	2,03	3991,56	654	554	988	792
1000	507	0,400	2,20	2,33	5302,87	762	640	1185	940

Figura 4.22: Catálogo cables Ultraflex [24]

4.2.5. Ensamblaje experimental de la batería eléctrica

4.2.5.1. Aspecto teórico

El voltaje de trabajo para la batería eléctrica es de 72V. Además, la autonomía es de un valor mayor o igual al rango de 25 a 30 minutos de conducción, según la Tabla 4.1. Se proporciona una descarga máxima de corriente de 147A desde la batería, al considerar un régimen alto de potencia según la tabla en la Figura 4.12.

La célula implementada (Fig. 4.23) ofrece 3.6V de tensión nominal. Se obtiene los 72V requeridos mediante una conexión en *serie* de 20 unidades. A partir de ahora cada elemento o grupo en una conexión en serie se denomina *módulo*.



Figura 4.23: Batería BAK 21700

Se eleva la capacidad de la batería mediante una conexión en *paralelo*. Además, se considera el espacio físico disponible en la motocicleta (Fig. 4.24) y la cantidad de corriente máxima que se extra de cada célula, sin exceder la capacidad máxima de descarga. Se realiza una conexión de 15 células en paralelo por cada módulo.



Figura 4.24: Medición de espacio disponible para batería

La descarga máxima en cada célula es

$$\text{Intensidad}_{\text{célula}} = \frac{\text{Intensidad total}}{\text{nro. células en paralelo}} \quad (4.52)$$

$$I_c = \frac{147 \text{ Amperios}}{15 \text{ unidades}} \quad (4.53)$$

$$I_c = 9,8A, \quad (4.54)$$

donde $9,8 A$ es la descarga de corriente máxima por cada célula. El valor es favorable al ser de menor que su capacidad máxima.

La capacidad total de la batería al incluir 15 unidades en paralelo es de $75Ah$. Para estimar la duración de la batería se implementa la Ecuación 4.55 [19]. Su expresión es

$$t_o = \frac{Q}{I_o}, \quad (4.55)$$

donde t_o es el tiempo de operación continua, Q es la carga de la batería y I_o es la corriente de operación [19].

La duración estimada de la batería es

$$t_o = \frac{75Ah}{100A} \quad (4.56)$$

$$t_o = 0,75h, \quad (4.57)$$

la duración en minutos es de 45. Además, el valor es de mayor duración a lo registrado en la Tabla 4.1.

4.2.5.2. Segmento práctico

El aspecto final de la batería eléctrica se observa en la Figura 4.25. La batería consta de 20 módulos conectados en serie y cada módulo con 15 células conectadas en paralelo. El total de unidades es de 300 células.



Figura 4.25: Batería eléctrica de 72V y 75Ah

El ensamble de la batería se realiza con 40 separadores (Fig. 4.26), para mantener una separación entre cada células, debido al incremento de temperatura durante la descarga de corriente eléctrica (Fig. 4.27).



Figura 4.26: Impresión 3D de separadores de batería



Figura 4.27: Armado de batería con separadores

Las conexiones en serie y paralelo se realizan mediante una unión de soldadura por puntos, entre los terminales positivo y negativo de cada una. Además, se implementa dos capas de lámina níquel de 8mm de ancho por 0,15mm de espesor, que brinda la capacidad de soportar hasta siete amperios por cada tira de níquel (Fig. 4.28).

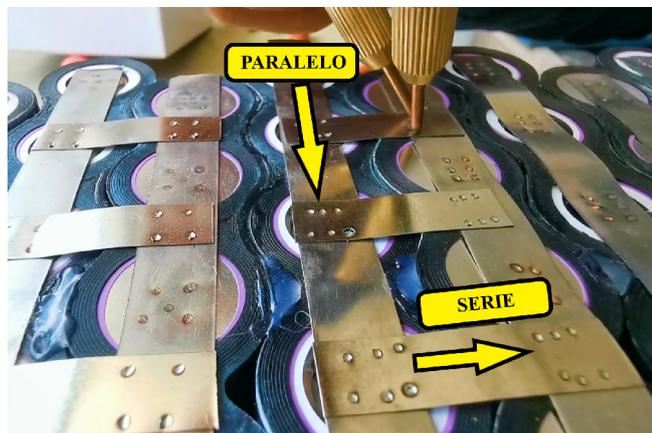


Figura 4.28: Soldadura de puntos en batería eléctrica

La conexión interna de la batería y BMS se observa en la Figura 4.29. Donde el polo positivo de cada módulo y el polo negativo principal son conectados al BMS, por medio de dos conectores tipo hembra. Además, el polo negativo se conecta a la entrada **B-** del BMS, y el polo negativo de la batería es ahora la salida **P-** del BMS.

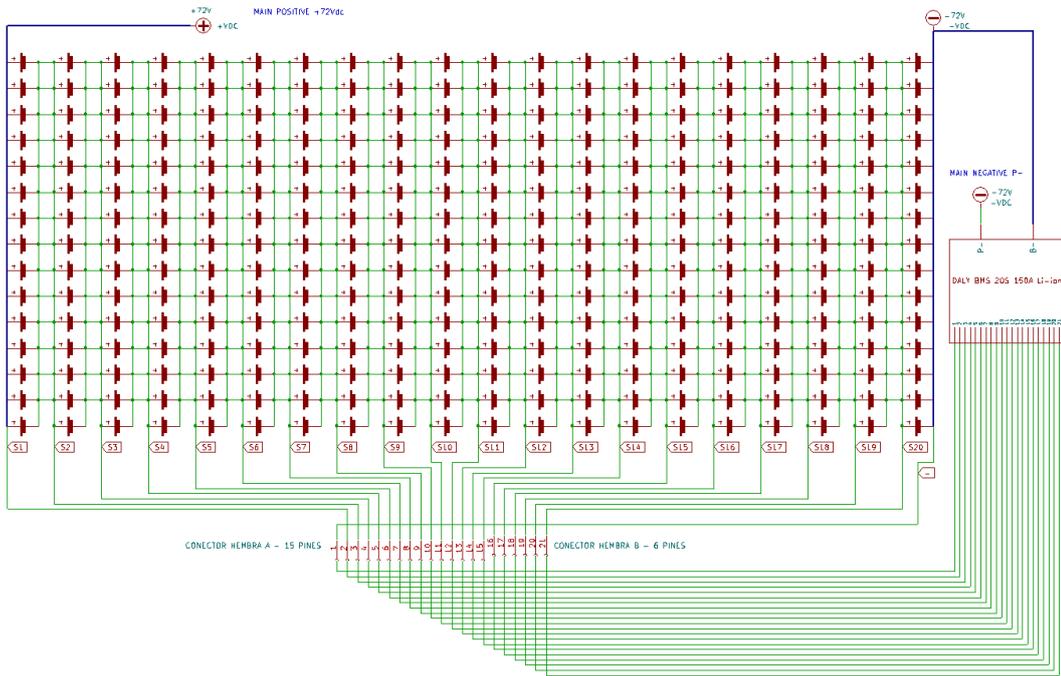


Figura 4.29: Esquema de conexión de batería eléctrica y BMS

La conexión al BMS se realiza mediante cables conductores y una unión soldada (Fig. 4.30). Las líneas de conexión presentan dos conectores tipo macho y se conectan en la periferia de la placa BMS, como se muestra en la Figura 4.31.

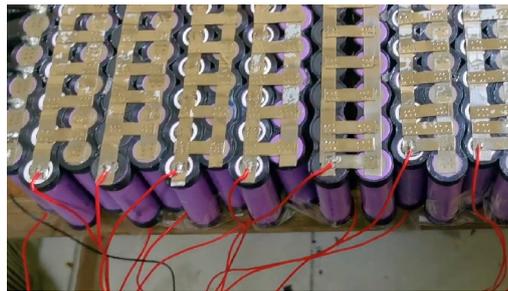


Figura 4.30: Unión por soldadura en cables del BMS a batería

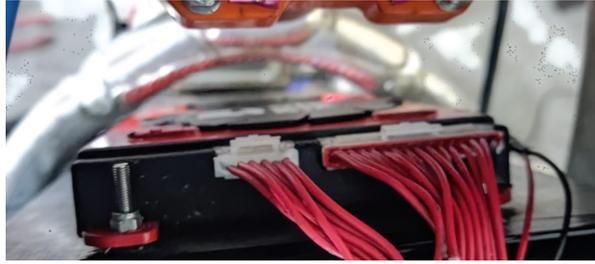


Figura 4.31: Conexión de BMS y batería eléctrica

A fin de mantener una hermeticidad contra agentes externos, resistir impactos y mantener un ajuste adecuado de la batería por el movimiento, la batería se encuentra dentro de una estructura metálica. El metal de fabricación en la estructura es de acero galvanizado, con un espesor de 1.3 mm , como se observa en la Figura 4.32.



Figura 4.32: Carcasa metálica para batería eléctrica

4.2.6. Ensamblaje mecánico

4.2.6.1. Soportes del motor eléctrico

El motor eléctrico se encuentra en acople con dos elementos metálicos, mediante una sujeción con pernos. El diseño CAD de los soportes se aprecia en la Figura 4.33.

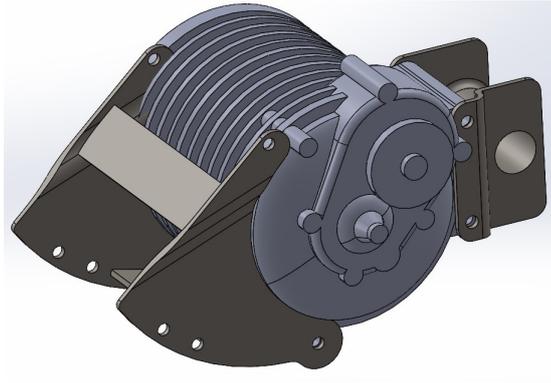


Figura 4.33: Soportes de motor eléctrico

En la Figura 4.34 se observa el punto A y B. En el punto A se encuentra el punto de anclaje del basculante de la motocicleta. Además, coincide con el centro de rotación o pivote de la rueda posterior. Por otra parte, el punto B es el centro del eje de rotación del piñón motriz del motor eléctrico. Dado la imposibilidad mecánica de coincidir ambos puntos, por forma y ubicación de los componentes, se aplicó una distancia vertical y horizontal entre ambos puntos. El propósito es coincidir lo más posible el punto B con el centro de rotación de la llanta posterior, al aplicar el peso del conductor [6].

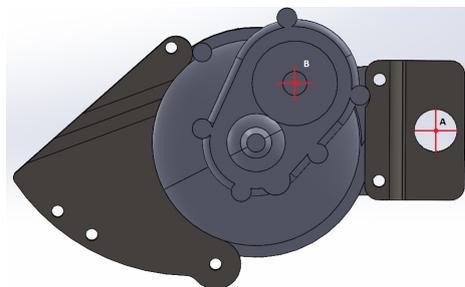


Figura 4.34: Pivote de rueda posterior y centro de piñón motriz

■ Análisis estático de soportes del motor eléctrico

Mediante un análisis estático de elementos finitos, se realiza una simulación de resistencia mecánica de los soportes. Además, se verifica su factor de seguridad y se garantiza que los elementos resistan los esfuerzos aplicados.

El soporte frontal y posterior se fabrica a partir de una lámina de acero A36 de 4mm de espesor. En la Figura 4.35 se aprecia como al soporte frontal se aplica un esfuerzo de tensión de 442,56N. El esfuerzo representa al peso de todos los elementos que debe soportar por sobre el área dónde se aplica dicha fuerza.

También se añade un esfuerzo de torsión de 120Nm que representa el torque máximo teórico que alcanza el motor eléctrico, según sus información comercial de la Tabla 4.3.

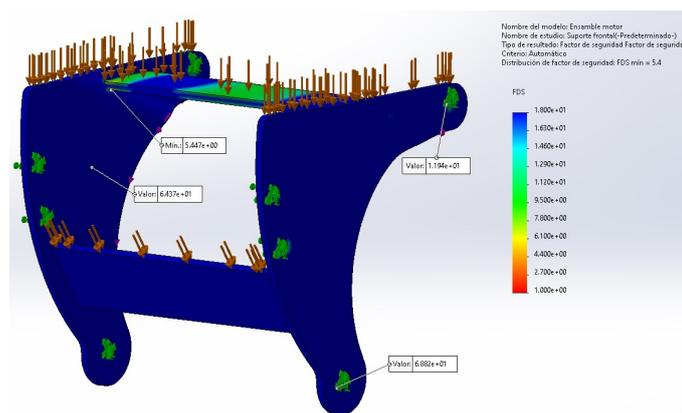


Figura 4.35: Analisis estático de soporte frontal

El factor de seguridad mínimo en el soporte frontal es de 5,44, ubicado en el nudo de la placa transversal superior. Sin embargo, el factor de seguridad mínimo en las secciones de sujeción es de 11,94, ubicado en las perforaciones superiores. Los valores que se obtienen mediante la simulación muestran que el elemento tiene la capacidad de resistir los esfuerzos aplicados.

En la Figura 4.36, se muestra como al soporte posterior es aplicado un esfuerzo de tensión de 448,92N y de igual manera, un esfuerzo de tracción de 120Nm.

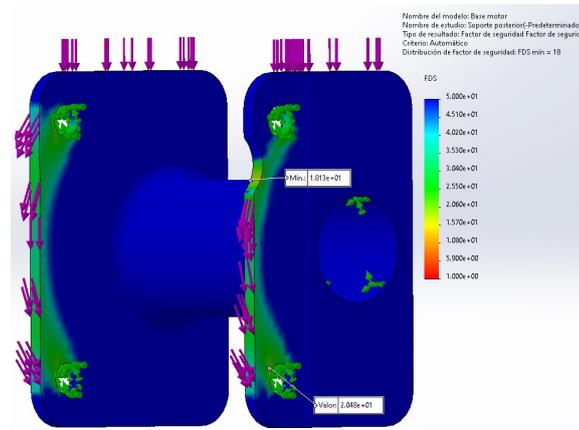


Figura 4.36: Análisis estático de soporte posterior

El factor de seguridad mínimo en el soporte posterior es de 18,13. Sin embargo, en las secciones de sujeción el factor de seguridad es de 20,48.

En el análisis estático de los componentes, se prefieren valores altos de factor de seguridad, debido a que no se incluyen los esfuerzos aplicados durante la maniobra de conducción.

4.2.6.2. Estructura de soporte para batería eléctrica

La batería eléctrica se introduce en una carcasa metálica (Fig. 4.37). Además, la carcasa reposa sobre una estructura metálica con puntos de sujeción coincidentes con la estructura de la motocicleta y el soporte frontal del motor.

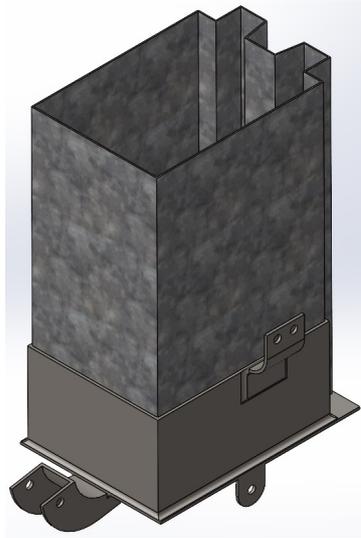


Figura 4.37: Carcasa de batería eléctrica y soporte

En la Figura 4.38 se presenta el ensamble mecánico de los elementos estructurales del motor eléctrico y batería.

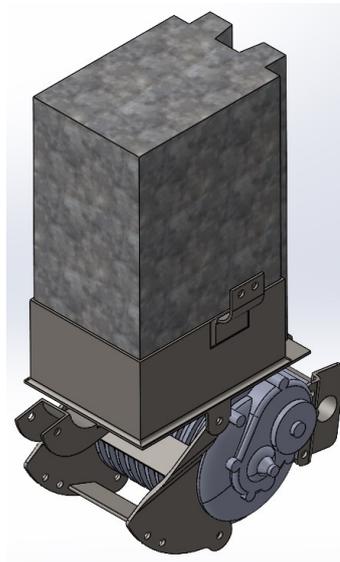


Figura 4.38: Ensamble mecánico principal de motor eléctrico y batería

El resto de componentes en la implementación se acoplan a puntos de sujeción disponibles en la estructura de la motocicleta.

■ Análisis estático de soporte de batería

La carcasa de la batería se fabrica en lámina de acero galvanizado de $1,5\text{mm}$ de espesor. Además, en el análisis de la Figura 4.39 se aplica un esfuerzo de $275,36\text{N}$, por el peso propio de la batería ($24,98\text{Kg}$) hacia la placa inferior de la carcasa.

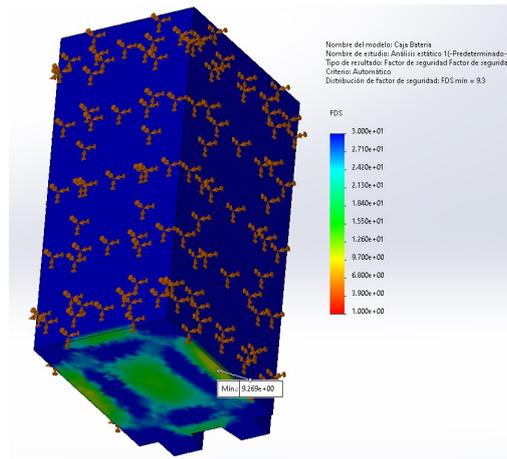


Figura 4.39: Análisis estático del case de batería eléctrica

Se obtiene un factor de seguridad mínimo de $9,27$, que demuestra la capacidad de soportar el peso de la batería durante el un análisis estático.

En el análisis de la Figura 4.40 sobre el soporte de la carcasa de la batería, se obtiene un factor de seguridad mínimo de $15,94$, ubicado cerca de las perforaciones de sujeción inferior. Durante la simulación se aplica un esfuerzo de tensión de $313,46\text{N}$ correspondiente al peso de los componentes por encima del soporte.

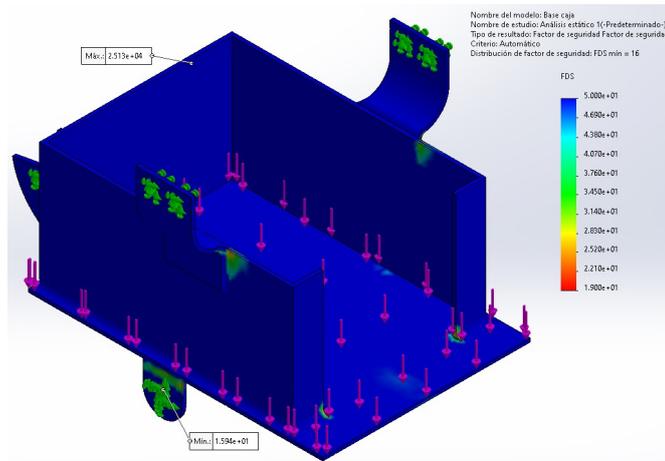


Figura 4.40: Análisis estático del soporte de batería batería

4.2.7. Conexión eléctrica

La conexión eléctrica del sistema se aprecia en el Anexo D. Para el circuito eléctrico se implementa 3 interruptores y sus funciones son:

- Interruptor 1: Energiza al convertor DC-DC (Fig. 4.41)

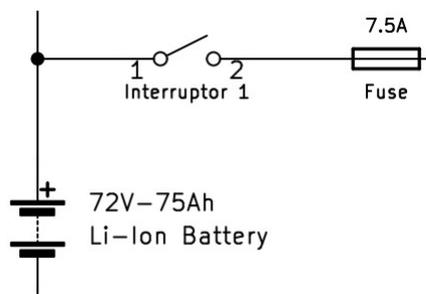


Figura 4.41: Interruptor 1 en el diagrama eléctrico general

- Interruptor 2: Energiza el contacto de la bobina del relay (Fig. 4.42)

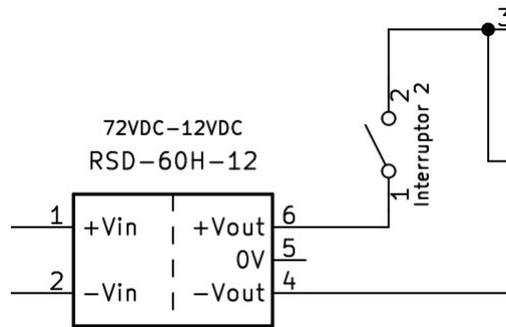


Figura 4.42: Interruptor 2 en el diagrama eléctrico general

Cuando el contacto del segundo interruptor se cierra, el controlador se encuentra energizado.

- Interruptor 3: Activa o desactiva el seguro eléctrico del controlador (Fig. 4.43)

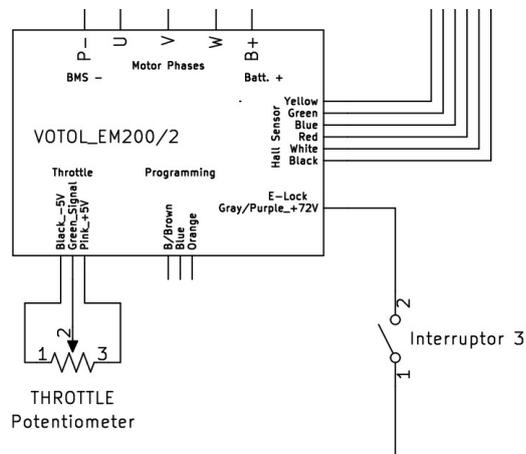


Figura 4.43: Interruptor 3 en el diagrama eléctrico general

El controlador presenta un seguro eléctrico, que al cerrar el contacto del interruptor 3, se habilita la conducción del vehículo.

4.2.8. Configuración de dispositivos

■ BMS

El dispositivo de gestión BMS, incorpora un módulo bluetooth que se configura para cada escenario en particular. La interfaz principal muestra al usuario el voltaje de la batería, control de temperatura y voltaje de cada módulo interno de la batería. La interfaz de usuario se muestra en la Figura 4.44.

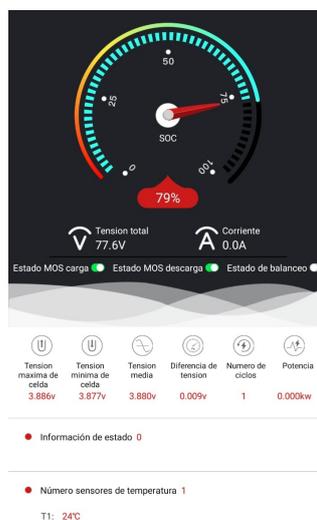


Figura 4.44: Interfaz de usuario BMS DALY

En la configuración principal del BMS se introduce el valor de voltaje mínimo y máximo de la batería, y la descarga máxima de corriente. En la Figura 4.45 se observa la configuración de los parámetros de la batería.



Figura 4.45: Configuración de voltaje y corriente en BMS

El BMS se protege mediante un corte en la descarga de corriente cuando se supera el valor de temperatura establecido. Además, el valor de temperatura interna de la batería se censa constantemente mediante un sensor NTC ubicado en su interior. La pestaña de la configuración de temperatura se muestra en la Figura 4.46.

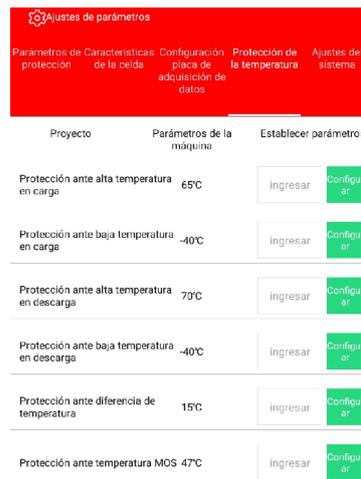


Figura 4.46: Configuración de temperatura en BMS

- Controlador

En el controlador se configura información de voltaje y corriente de la batería eléctrica. En la Figura 4.47 se aprecia la configuración dentro de la interfaz de usuario del controlador Votol.

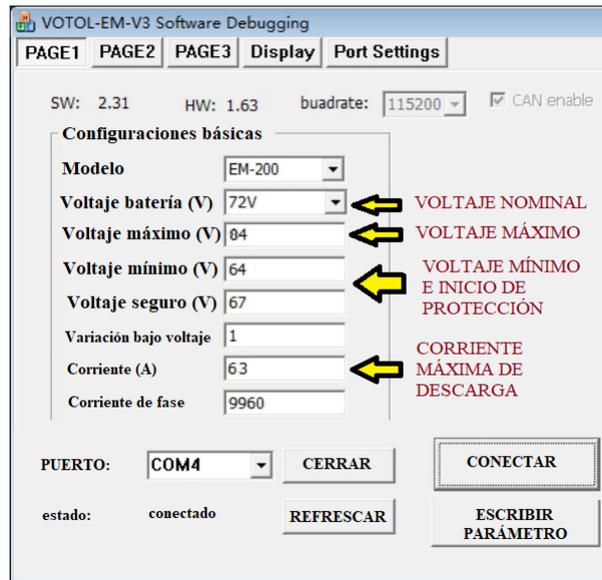


Figura 4.47: Configuración de controlador Votol EM200/2

4.3. Pruebas de validación

Las pruebas de conducción se realizan en el complejo deportivo *Las Garzas*, ubicado en la ciudad de Ibarra provincia Imbabura. Además, con condiciones atmosféricas favorables y en ausencia de lluvia.

Para efecto de medición de la velocidad, se implementa un velocímetro digital externo. Además, siendo compatible con el protocolo UART del controlador Votol EM200/2.



Figura 4.48: Prototipo

4.3.1. Prueba A

En la prueba A (Fig. 4.49) se recrea las condiciones ideales de los parámetros en el registro de la Tabla 4.1 y 4.2. Además, se verifica el desempeño del prototipo en base a los requerimientos iniciales establecidos.



Figura 4.49: Inicio de la prueba de conducción A

El voltaje nominal de la batería eléctrica es de 72V. Sin embargo, en la prueba A se establece un rango de voltaje entre 82V y 60V. Se aproxima el valor máximo de voltaje por debajo de la carga máxima permisible de la batería.

La velocidad lineal en la prueba A se limita a 55km/h. Además, se mantiene constante la velocidad, puesto que la aceleración altera el consumo eléctrico de la batería, por ende, su autonomía.

4.3.1.1. Resultados en prueba A

- Autonomía

Durante la prueba A, se registra el voltaje de la batería cada dos minutos. Se observa en la tabla de la Figura 4.50, que el prototipo alcanza 120 minutos de autonomía a una velocidad constante de 55km/h. Sin embargo, durante un test de prueba, se registra una velocidad máxima de 84.39km/h.

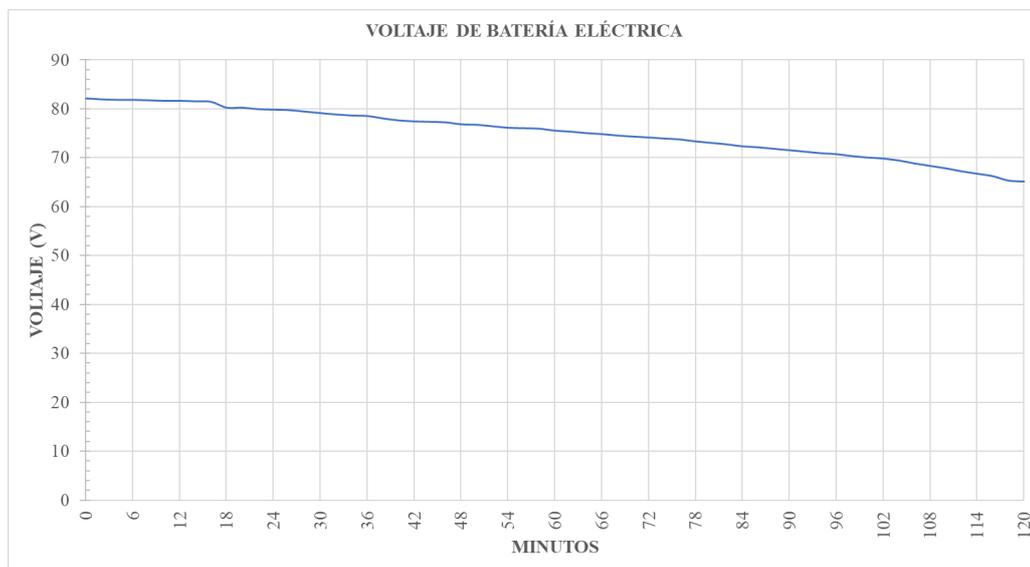


Figura 4.50: Registro del consumo de batería en prueba A

La distancia recorrida se registra mediante la implementación de un odómetro. Su valor es de 103.4Km, como se observa en la Figura 4.51.



Figura 4.51: Registro de distancia recorrida en A

- Ciclo de descarga

Recurriendo a la interfaz de usuario del BMS, se obtiene que el valor de voltaje al inicio de la prueba es de 82.2. Además, que la temperatura en el ambiente es de 21 °C (Fig. 4.52).



Figura 4.52: Lectura de voltaje en BMS

En el transcurso de la prueba A, se registra un valor de corriente eléctrica de 38,1A, como se observa en la Figura 4.53. Además, en el instante de la lectura se aprecia una potencia eléctrica de 2,708KW emitida por la batería.



Figura 4.53: Lectura de corriente en BMS

Se multiplica el valor de potencia eléctrica de la batería por el número de horas de operación ($2h$), para estimar el consumo eléctrico del prototipo. El consumo eléctrico del vehículo se estima en $5,416KWh$.

Durante el proceso de descarga, se presenta un incremento de temperatura en el interior de la batería eléctrica. Hasta el minuto 120, el BMS registra una temperatura de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fig. 4.54). Motivo por el cual se finaliza la prueba y registra un voltaje de $65.2V$ (Fig. 4.55).

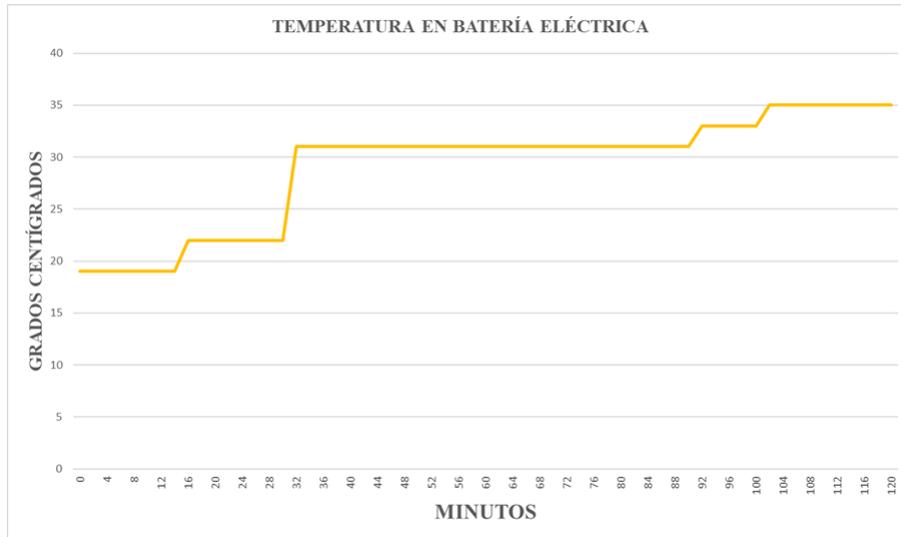


Figura 4.54: Gráfica de registro de temperatura en batería



Figura 4.55: Lectura de voltaje mínimo en batería eléctrica

En la Figura 4.56 se implementa un termómetro infrarrojo digital para medir la temperatura del resto de los componentes. En la Tabla 4.12 se exponen éstos valores.



Figura 4.56: Medición de temperatura de los componentes

Tabla 4.12: Registro de temperatura en prueba A

Componente	Temperatura
Batería	35°C
Carcasa de batería	32.5°C
Relay	33.1°C
Conductor eléctrico principal	29.7°C
Motor eléctrico	40.2°C

4.3.2. Prueba B

Se realiza una prueba de conducción adicional con el fin de apreciar el desempeño del prototipo en la disciplina del motocross (Fig. 4.57).

El voltaje máximo inicial de la batería se establece en 82V, el mínimo en 65V y la descarga de corriente en la máxima permisible.



Figura 4.57: Transcurso de la prueba de conducción B

4.3.2.1. Resultados en prueba B

- Autonomía

Mediante una aplicación móvil de cronometría, se registran 42 minutos 54 segundos de conducción en la prueba B. Como se aprecia en la Figura 4.58.

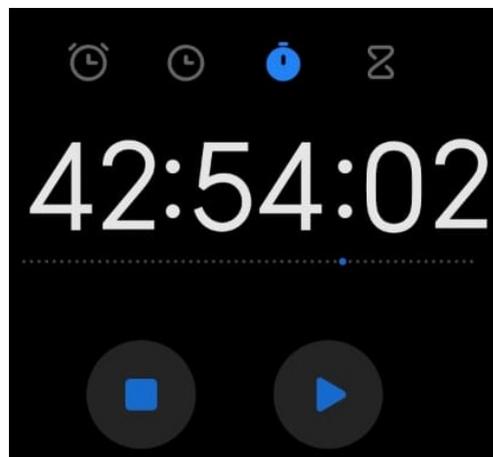


Figura 4.58: Tiempo de conducción en prueba B

Mediante una lectura visual del velocímetro, se registra una velocidad máxima de 106km/h .

- Ciclo de descarga

En la interfaz del BMS, se observa 82.1V de tensión en la batería eléctrica al inicio de la prueba (Fig. 4.59). Además, el voltaje mínimo se registra en 65.2V. Como se aprecia en la Figura 4.60. Sin embargo, la temperatura máxima de la batería es de 37°C.



Figura 4.59: Interfaz BMS en prueba B



Figura 4.60: Voltaje mínimo en prueba B

En la Tabla 4.13 se presenta los resultados de temperatura de los componentes del prototipo. Además, se utiliza el dispositivo implementado en 4.56.

Tabla 4.13: Registro de temperatura en prueba B

Componente	Temperatura
Batería	37°C
Carcasa de batería	34°C
Relay	47.6°C
Conductor eléctrico principal	31.2°C
Motor eléctrico	42.6°C

4.4. Costo de equipos y materiales

El valor económico de los equipos y accesorios implementados en el proyecto se avalúa en un total de 2.562,5\$ dólares americanos, el valor es desglosado en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14: Precio de equipos y accesorios

Equipo / Accesorio	Precio unitario	Cantidad	Precio total
Motor eléctrico	310\$	1	310\$
Batería eléctrica	5.44\$	300	1632\$
Controlador	295\$	1	295\$
BMS	135\$	1	135\$
Acelerador	20\$	1	20\$
Convertor DC-DC	45\$	1	45\$
Relay-Contactor	50\$	1	50\$
Cadena de transmisión	15\$	2	30\$
Piñon motriz	5\$	1	5\$
Catalina	12\$	1	12\$
Interruptor	9,5\$	3	28,5\$

En los materiales utilizados se tiene un valor de 239,83\$ dólares americanos. El detalle de los materiales se desglosa en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15: Precio de materiales

Material	Factor	Cantidad	Precio unitario	Total
Cable conductor AWG 1/0	metro	3	25\$	37,5\$
Cable conductor AWG 14	metro	2	2,4	4,8\$
Terminales de conexión AWG 1/0	unitario	8	0,75\$	6\$
Terminales de conexión AWG 14	unitario	26	0,38\$	9,88\$
Cinta eléctrica autosoldable	rollo	1	22\$	22\$
Acero Galvanizado (1.5x1.5)m x 1.3mm	plancha	1.5	45	67,5\$
Acero A36 (1m x1m x4mm)	plancha	1	32	32\$
Acero A36 (1m x1m x3mm)	plancha	1	28	28\$
Perno Acero (M8 x 15mm)	unitario	8	0,5	4\$
Perno Acero (M6 x 15mm)	unitario	8	0,3	2,4\$
Perno Acero (M3 x 15mm)	unitario	8	0,25	2\$
Cinta de Nickel (0.15 x 8)mm	unitario	8	0,25	2\$
PLA Negro	rollo	1.5	14,5	21,75\$

En el valor total del proyecto no se considera impuestos e importación. Además, se define en 2,802.33\$ dólares americanos.

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajo Futuro

5.1. Conclusiones

- Las principales fuerzas de oposición al movimiento en un vehículo terrestre se encuentran en su eje longitudinal, que corresponde al eje en dirección del desplazamiento del vehículo.
- El modelo de determinación de potencia requerida aplicado recrea un ambiente de conducción de carácter ideal propuesto por el usuario, de tal manera que, la prueba de validación A muestra el cumplimiento de los requerimientos establecidos y un valor superior a la autonomía deseada, evidenciando que la implementación real es capaz de suplir los requerimientos teóricos.
- La pruebas de conducción del prototipo validan la posibilidad de integrar un sistema de propulsión eléctrico en una motocicleta diseñada a funcionar con un motor a combustión interna.
- La prueba de conducción A muestra que el prototipo satisface los requerimientos iniciales previamente establecidos, validando el modelo de determinación de potencia eléctrica necesaria implementado en el proyecto.

- El diseño experimental de la batería eléctrica cumple con los requisitos de diseño implementados, sin embargo muestra un registro máximo de temperatura de 35 °C durante la prueba de conducción A, siendo este valor superior al de 25 °C que expone la hoja de datos de la batería como valor máximo a una descarga superior a su capacidad nominal.
- El rango de potencia eléctrica durante las pruebas de validación fueron superiores a la potencia nominal del motor eléctrico seleccionado que además presentó un registro de temperatura máxima de 42.1 °C, valor que es inferior al de la temperatura máxima de operación expuesta en su hoja de datos, por lo tanto se concluye que el prototipo puede utilizar el rango de potencia máxima del motor aplicando un bajo factor de servicio y ciclo de trabajo, reduciendo las probabilidades de acortar la vida útil del motor de forma prematura.
- La aplicación de un motor eléctrico de tipo central brinda cierta posibilidad de cambiar la respuesta de la motocicleta en velocidad final y aceleración intercambiando el valor de la relación de transmisión de la catalina y piñon motriz.
- La implementación de un controlador programable para el motor eléctrico ofrece la capacidad de modificar la respuesta en la entrega de torque mediante un control PID a través de su interfaz gráfica y comunicación con el ordenador, ésto representa una personalización para recrear un estilo de conducción preferencial para el usuario final.
- El monitoreo inalámbrico por conexión Bluetooth del Sistema de Gestión de Batería B.M.S. durante las pruebas de validación fue herramienta importante para el control de la temperatura en la batería eléctrica en el aspecto de seguridad.
- El valor de corriente de descarga máxima configurado en el BMS implementado es un valor de referencia que al ser superado inicia una desactivación del BMS a modo de seguridad, mientras que el valor de corriente de descarga máxima configurado en el controlador si representa una limitación de demanda de corriente para el motor eléctrico.

5.2. Recomendaciones

- Es fundamental realizar una amplia investigación de componentes comerciables y disponibles para una conversión eléctrica, debido al poco espacio utilizable en una estructura de motocicleta cada cambio de última hora de componente puede repercutir seriamente en la aplicación de todos los elementos partícipes.
- Diseñar la batería eléctrica implementando módulos o células de baterías con alta capacidad de descarga de corriente, para no elevar considerablemente la temperatura de la batería total durante la descarga.
- Para una conversión eléctrica de motocicleta con el fin de ser conducida en terrenos irregulares y con presencia de obstáculos, la incorporación de motores eléctricos centrales beneficia el aporte de masa del motor eléctrico a la masa suspendida de la motocicleta, y además brinda la capacidad de modificar su respuesta de velocidad final y torque personalizando la relación de transmisión.
- Para una conversión eléctrica de motocicleta destinada a superficies de terreno más regulares es aconsejable la implementación de un motor eléctrico tipo hub, brindando la capacidad de obtener un espacio considerablemente mayor para la batería eléctrica ubicado en el interior del chasis ampliando su tamaño o capacidad.
- Mantener una zona de trabajo segura e implementar equipo de protección personal adecuado para evitar en lo más posible el riesgo eléctrico debido al considerable peligro que representa una incorrecta manipulación de baterías de litio.

5.3. Trabajo futuro

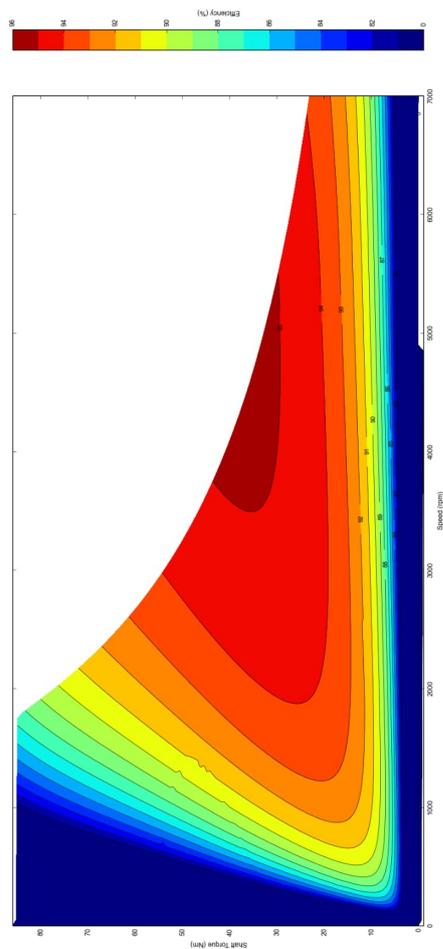
- Diseñar e instalar una cobertura a los elementos eléctricos expuestos a la interperie para garantizar la seguridad de su operación bajo condiciones meteorológicas extremas.

- Realizar un proceso de alivianado del peso de componentes estructurales añadidos en el proyecto sin comprometer su resistencia, para mejorar el desempeño de la motocicleta en autonomía, maniobras y aceleración.
- Integrar un puerto de carga con grado de protección IP y un interruptor a fin de mantener la línea positiva y negativa desenergizadas reduciendo el riesgo eléctrico durante maniobras de conexión, desconexión o mantenimiento.
- Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo para la batería y motor eléctrico.
- La integración del prototipo eléctrico en eventos deportivos de motociclismo off-road en la provincia de Imbabura de forma particular.

Anexos

Anexo A

Curva de eficiencia motor QS138-70H



Anexo B

Ponderación de criterios: Motor eléctrico

MATRIZ PONDERACIÓN DE CRITERIOS													
CRITERIOS	Precio	Potencia	Torque	Tensión de trabajo	Eficiencia	Aporte de masa	Geometría	Adaptabilidad	Sensorica	Corriente Máxima			
Precio	1	5	3	5	5	3	1	1	3	1			
Potencia	1/5	1	1	1/5	3	3	3	1/3	5	3			
Torque	1/3	1	1	1/3	5	1	1/5	1	3	1			
Tensión de trabajo	1/5	5	3	1	5	3	1	1/3	5	1			
Eficiencia	1/5	1/3	1/5	1/5	1	1/5	1/7	1/7	3	1/5			
Aporte de masa	1/3	1/3	1	1/3	5	1	1	1/3	7	5			
Geometría	1	1/3	5	1	7	1	1	3	9	7			
Adaptabilidad	1	3	1	3	7	3	1/3	1	9	7			
Sensorica	1/3	1/5	1/3	1/5	1/3	1/7	1/9	1/9	1	1/7			
Corriente Máxima	1	1/3	1	1	5	1/5	1/7	1/7	7	1			
TOTAL (N)	5,600	16,533	16,533	12,267	43,333	15,543	7,930	7,397	52,000	26,343			
MATRIZ NORMALIZADA													
	0.179	0.302	0.181	0.408	0.115	0.126	0.135	0.058	0.038	1.3/4	1/6	17%	
	0.036	0.060	0.060	0.016	0.069	0.193	0.378	0.045	0.096	0.114	1	1/9	11%
	0.060	0.060	0.060	0.027	0.115	0.064	0.025	0.135	0.058	0.038	2/3	0	6%
	0.036	0.302	0.181	0.082	0.115	0.193	0.126	0.045	0.096	0.038	1.2/9	1/8	12%
	0.036	0.020	0.012	0.016	0.023	0.013	0.018	0.019	0.058	0.008	2/9	0	2%
	0.060	0.020	0.060	0.027	0.115	0.064	0.126	0.045	0.135	0.190	5/6	0	8%
	0.179	0.020	0.302	0.082	0.162	0.064	0.126	0.406	0.173	0.266	1.7/9	1/6	18%
	0.179	0.181	0.060	0.245	0.162	0.193	0.042	0.135	0.173	0.266	1.5/8	1/6	16%
	0.060	0.012	0.020	0.016	0.008	0.009	0.014	0.015	0.019	0.005	1/6	0	2%
	0.179	0.020	0.060	0.082	0.115	0.013	0.018	0.019	0.135	0.038	2/3	0	7%
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1	100%

VALORACION DE COMPARACION	
1	Igual
1/2	Moderada
1/3	Fuerte
1/4	Muy Fuerte
1/5	Extrema

Anexo C

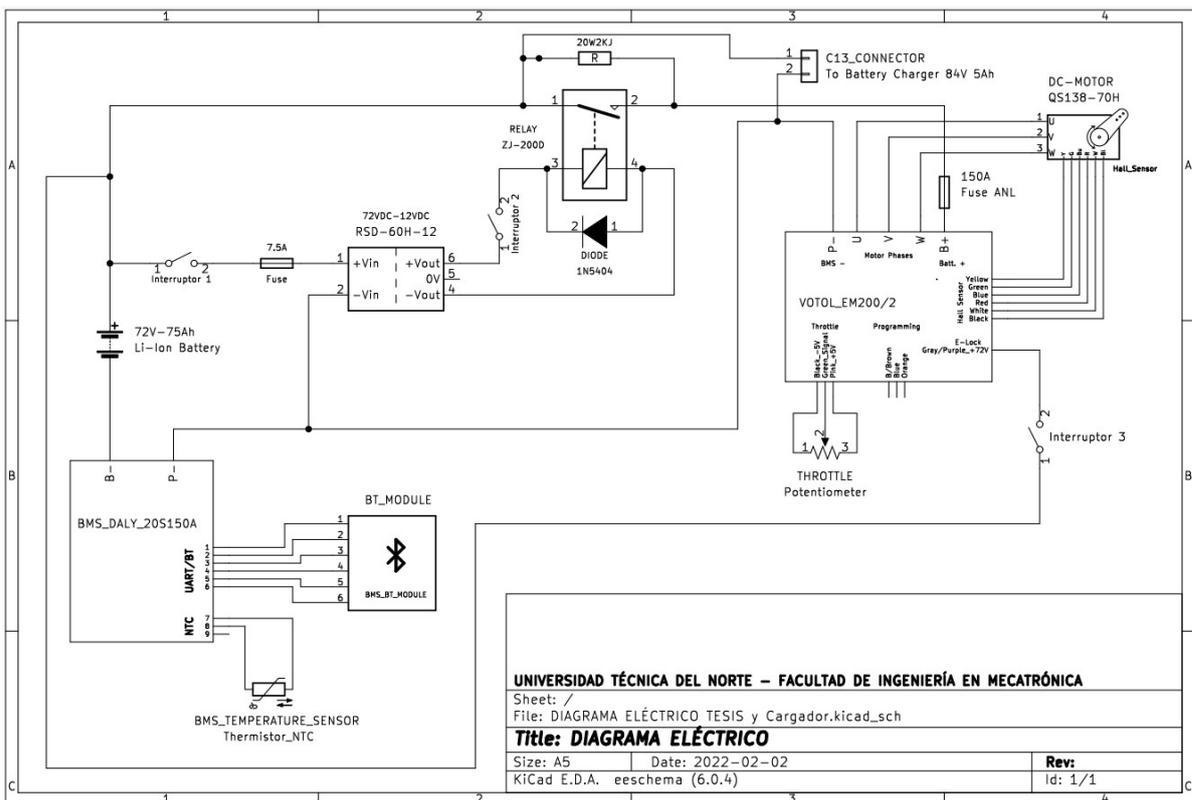
Ponderación de criterios: Batería eléctrica

MATRIZ PONDERACIÓN DE CRITERIOS											
CRITERIOS	Voltaje	Capacidad	Tamaño	Descarga M.	Temp. Opera.	Disponibilidad	Precio	Tipo			
Voltaje	1	1/5	1/5	1/3	1	1/7	3	5			
Capacidad	5	1	1	1	3	1/7	3	7			
Tamaño	5	1	1	1	9	1	3	7			
Descarga M.	3	1	1	1	1	1/3	3	3			
Temp. Opera.	1	1/3	1/9	1	1	1/9	1/7	1/7			
Disponibilidad	7	7	1	3	9	1	3	3			
Precio	1/3	1/3	1/3	1/3	7	1/3	1	1/3			
Tipo	1/5	1/7	1/7	1/3	7	1/3	3	1			
TOTAL (N)	22.533	11.010	4.787	8.000	38.000	3.397	19.143	26.476			
MATRIZ NORMALIZADA											
0.044	0.018	0.042	0.026	0.042	0.157	0.189	0.157	0.189	5/9	0	7%
0.222	0.091	0.209	0.125	0.079	0.042	0.157	0.264	0.264	1.1/5	1/7	15%
0.222	0.091	0.209	0.125	0.237	0.294	0.157	0.264	0.264	1.3/5	1/5	20%
0.133	0.091	0.209	0.125	0.026	0.098	0.157	0.113	0.113	1	1/8	12%
0.044	0.030	0.023	0.125	0.026	0.033	0.007	0.005	0.005	2/7	0	4%
0.311	0.636	0.209	0.375	0.237	0.294	0.157	0.113	0.113	2.1/3	2/7	29%
0.015	0.030	0.070	0.042	0.184	0.098	0.052	0.013	0.013	1/2	0	6%
0.009	0.013	0.030	0.042	0.184	0.098	0.157	0.038	0.038	4/7	0	7%
1	1	1	1	1	1	1	1	1	8	1	100%

VALORACIÓN DE COMPARACIÓN	
Igual	1
Moderada	3
Fuerte	5
Muy Fuerte	7
Extrema	9

Anexo D

Diagrama eléctrico



Bibliografía

- [1] C. Eisenmann, D. Görges and T. Franke, “Electric Vehicles”, in *International Encyclopedia of Transportation*, pp. 147-154, 2021.
- [2] A. Habibie, M. Hisjam, W. Sutopo and M. Nizam, “Sustainability Evaluation of Internal Combustion Engine Motorcycle to Electric Motorcycle Conversion”, in *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, vol. 08, no. 02, pp. 469-476, 2021.
- [3] C. Vogel, *Build Your Own Electric Motorcycle*. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [4] H. I. Mohamed-Nour, J. W. Quigley and R. Das, “Desing Considerations In An Efficient Electric Motorcycle”, in *IEEE 20th Annual Battery Conference on Applications and Advances*, Long Beach, CA, USA, Jan. 14-17, 1997.
- [5] T. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers, 1992.
- [6] T. Foale, *Motorcycle Handling And Chassis Design*. Spain: Tony Foale, 2006.
- [7] D. Jumbo y P. Reyes, “Implementación de un motor eléctrico sobre el chasis de una motocicleta Yamaha TTR125”, Tesis de Ingeniería Mecánica Automotriz, Univ. Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2012.
- [8] B. Maxwell, “Building and Electric Motorcycle: Design and Construction of a Zero Roadside Emissions Vehicle”, Mechanical Engineering Honors Theses, Union College, Schenectady-NY, USA, 2011.

- [9] J. Blissett, “A wholistic motor design philosophy for electric motorcycles in motorsport”, PhD thesis, University of Nottingham, UK, 2019.
- [10] S. Puma, J. Izquierdo, R. Galluzzi and J. Calderon, “Influence of the Final Ratio on the Consumption of an Electric Vehicle Under Conditions of Standardized Driving Cycles”, in *Applied Sciences Journal*, vol. 11, no. 23, Dec. 2021.
- [11] V. Cossalter, *Motorcycle Dynamics*. Padova, Italia: Lulu, 2006.
- [12] J. Wong, *Theory of Ground Vehicles*. Canada: John Wiley & Sons, 2001.
- [13] Ó. Flores, M. Fabela y M. Martínez, “Efectos de Parámetros mecánicos y geométricos sobre el comportamiento dinámico de un vehículo unitario y un vehículo articulado”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfadila, Qro., México, Publicación Técnica Nro. 249, 2004.
- [14] A. Yamsani, “Gradeability for Automobiles”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 11, pp. 35-41, mar.-apr. 2014.
- [15] “Proyecciones Climáticas de Precipitación y Temperatura para Ecuador, Bajo Distintos Escenarios de Cambio Climático”, G. Armenta, J. Villa y P. Jácome, Ecuador, 2016 [En línea]. Disponible en: <https://info.undp.org/>. [Accedido: 01-mar-2022].
- [16] R. Ávila, L. Prado, E. González. (2007) “*Dimensiones Antropométricas de la Población Latinoamericana*” (2nd ed.) Mexico: Universidad de Guadalajara.
- [17] V. Palacios, “Sistema electrónico para el control de posición angular del eje de un motor trifásico asíncrono”, Tesis de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Univ. Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2016.
- [18] D. Ortiz, “Sistema de monitoreo del consumo energético en dispositivos mecatrónicos”, Tesis de Ingeniería en Mecatrónica, Univ. Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, 2021.

- [19] J. Becerril, “Diseño de etapa de potencia y control para un motor brushless de CD con frenado regenerativo aplicado a una moto deportiva eléctrica”, Tesis de Ingeniería en Mecatrónica, Univ. Nac. Autónoma de Mexico, Mexico, 2011.
- [20] L. Abatta, P. Moya, “Diseño, adaptación y conversión de una motocicleta de 100 c.c. a gasolina en eléctrica”, Tesis de Ingeniería Mecánica, Univ. Politécnica del Ejercito, Sangolquí, Ecuador, 2013.
- [21] Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, de reglamento electrotécnico para baja tensión. D 2413/1973.
- [22] *Instalaciones Eléctricas (Utilización)*, Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012.
- [23] SKF Group 2016, Transmission Chains, pp. 12-18.
- [24] Electrocables, Catálogo De Productos 2018, pp. 41-43.