UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

TEMA:

ANÁLISIS DE LA AUTONOMÍA DE UNA MOTOCICLETA ELÉCTRICA CONSIDERANDO LA TOPOGRAFÍA DE LAS PARROQUIAS URBANAS DEL CANTÓN IBARRA

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Edison Fernando Obando Clavijo

DIRECTOR:

Ing. Francisco Roberto Naranjo Cobo MSc.

IBARRA - ECUADOR

2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Obando Clavijo Edison Fernando

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis de la autonomía de una motocicleta eléctrica considerando la topografía de las parroquias urbanas del cantón Ibarra.
AUTOR (ES):	Obando Clavijo Edison Fernando
FECHA: DD/MM/AAAA	09/09/2026
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Francisco Roberto Naranjo Cobo MSc.

2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 9 días del mes de septiembre de 2026

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
EDISON FERNANDO OBANDO CLAVIJO

.....

Edison Fernando Obando Clavijo

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Ing. Naranjo Cobo Francisco Roberto MSc., en calidad de director del señor estudiante Obando Clavijo Edison Fernando, certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "**ANÁLISIS DE LA AUTONOMÍA DE UNA MOTOCICLETA ELÉCTRICA CONSIDERANDO LA TOPOGRAFÍA DE LAS PARROQUIAS URBANAS DEL CANTÓN IBARRA**"

Para la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FRANCISCO ROBERTO NARANJO COBO

…….

Ing. Naranjo Cobo Francisco Roberto MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi madre, María Clavijo, por ser el pilar fundamental de mi vida y mi mayor ejemplo de esfuerzo y sacrificio. Por su trabajo incansable durante todos estos años, por creer en mi incluso cuando yo mismo dudaba, y por ser ese refugio seguro al que siempre puedo acudir. A mi padre, Víctor Obando, por su guía constante y sus sabios consejos. Por enseñarme a tomar las mejores decisiones a través de sus palabras y por la confianza que siempre ha depositado en mis capacidades, las reflexiones que compartió conmigo me dieron claridad y fortaleza necesarias para no rendirme.

A mi hermana Margarita y a mi hermano Eduardo, por ser un apoyo constante a lo largo de este camino. Por la motivación que me brindan y por estar ahí para escucharme y aligerar la carga en los momentos de mayor exigencia. El ejemplo y el respaldo de ambos han sido fundamentales para llegar a esta meta.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Técnica del Norte y a mis docentes, por haberme brindado la formación académica, las bases técnicas y las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional a lo largo de la carrera.

Expreso mi más profundo agradecimiento a mi director de tesis, el Ing. Francisco Naranjo, por su guía constante, paciencia y valiosos conocimientos impartidos durante el desarrollo de este trabajo de investigación. De igual manera, agradezco a mi asesor, el PhD Gerardo Collahuazo, por sus observaciones y el respaldo brindado para llevar este proyecto a buen término.

Finalmente, extiendo mi gratitud a toda mi familia. A cada uno de mis familiares que, de forma directa o indirecta, me brindaron su tiempo, comprensión y aliento durante mi etapa universitaria y en la ejecución práctica de esta tesis. Su respaldo ha sido esencial para alcanzar este logro.

Tabla de contenido

DEDICATORIA 4

AGRADECIMIENTOS 5

ÍNDICE DE FIGURAS 10

ÍNDICE DE TABLAS 13

RESUMEN 15

ABSTRACT 16

CAPÍTULO I 17

INTRODUCCIÓN 17

1.1 Problema de investigación 17

1.1.1 Problemática a investigar 17

1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación 17

1.2 Objetivos 18

1.2.1 Objetivo General 18

1.2.2 Objetivos Específicos 18

1.3 Alcance de la investigación 18

1.4 Justificación 20

CAPÍTULO II 21

MARCO TEÓRICO 21

2.1 Antecedentes 21

2.2 Movilidad Eléctrica 23

2.2.1 Concepto y evolución de la movilidad eléctrica 23

2.2.2 Clasificación de los vehículos eléctricos 24

2.2.3 Ventajas y limitaciones de los vehículos eléctricos 24

2.2.4 Normativas y políticas de electromovilidad en Ecuador 25

2.2.5 La motocicleta eléctrica como eje de la movilidad urbana 26

2.3 Fundamentos de la autonomía 26

2.3.1 Factores que afectan la autonomía 26

2.3.2 Medición estandarizada de la autonomía (Ciclos de Conducción) 28

2.4 Tecnologías asociadas a las motocicletas eléctricas 29

2.4.1 Sistema de almacenamiento de energía 29

2.4.2 Sistema de gestión de baterías (BMS) 34

2.4.3 Motor eléctrico 35

2.4.4 Clasificación de motores usados en motocicletas eléctricas 36

2.4.5 Controlador electrónico y conversión de energía 38

2.5 Sistema de Adquisición de Datos (DAQ) 39

CAPÍTULO III 40

MATERIALES Y MÉTODOS 40

3.1 Enfoque y tipo de investigación 40

3.1.1 Enfoque de la investigación 40

3.1.2 Tipo de investigación 40

3.2 Diseño de la investigación 41

3.3 Área de estudio 42

3.4 Definición de las rutas de ensayo 42

3.5 Descripción del vehículo de prueba 45

3.5.1 Sistema de propulsión 46

3.5.2 Sistema de almacenamiento de energía 48
3.5.3 Sistema eléctrico auxiliar 51
3.5.4 Panel de Instrumentos 53
3.6 Operacionalización de variables 54
3.6.1 Variables eléctricas y energéticas 54
3.6.2 Variables de operación del vehículo 58
3.6.3 Variables topográficas 61
3.6.4 Variables ambientales 62
3.7 Materiales, equipos y software 63
3.7.1 Materiales y equipos 63
3.8 Procedimiento experimental 74
3.8.1 Desarrollo de los ensayos experimentales 75
3.8.2 Procesamiento de datos 76
3.8.3 Cálculo de variables 76
1CAPITULO IV 82
RESULTADOS Y ANÁLISIS 82
4.1 Implementación y validación del sistema DAQ 82
4.1.1 Arquitectura y diseño del sistema DAQ 82
4.1.2 Montaje físico e integración en el vehículo 86
4.1.3 Lógica de operación del sistema DAQ 89
4.1.4 Validación experimental del sistema DAQ 91
4.2 Resultados experimentales 92
4.2.1 Validación de la repetibilidad de los resultados 92

4.2.2 Resultados experimentales de la Ruta 1: Circuito Urbano Mixto 93

4.2.3 Resultados experimentales de la Ruta 2 98

4.2.4 Resultados experimentales de la Ruta 3 103

4.2.5 Resultados experimentales de la Ruta 4 107

4.2.6 Resultados experimentales de la Ruta 5 111

4.2.7 Resultados experimentales de la Ruta 6 117

4.2.8 Influencia de la carga adicional sobre el comportamiento energético de la motocicleta eléctrica.....122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloques del diseño de la investigación 41
Figura 2. Distribución espacial de las rutas experimentales evaluadas en el cantón Ibarra. 45
Figura 3. Motocicleta eléctrica Torino Racer.....45
Figura 4. Motor eléctrico BLDC tipo hub de 1200 W 47
Figura 5. Controlador electrónico de la marca Wuxi Lingbo.....48
Figura 6. Banco de baterías: (a) configuración del paquete de almacenamiento en el chasis, (b) detalle de la unidad individual TNE 12-25. 49
Figura 7. Cargador inteligente usado para recarga del banco de baterías: (a) vista general del equipo, (b) etiqueta de especificaciones técnicas.. 50
Figura 8. Convertidor DC/DC instalado en la motocicleta eléctrica. 52
Figura 9. Interruptor termomagnético de corriente continua instalado en la motocicleta eléctrica.....53
Figura 10. Panel de instrumentos digital de la motocicleta eléctrica. 54
Figura 11. Arquitectura general y protocolos de comunicación del sistema de adquisición de datos. 83
Figura 12. Diagrama esquemático de interconexiones eléctricas y de datos del sistema DAQ. 85
Figura 13. Diseño de la placa de circuito impreso (PCB) del sistema de adquisición de datos (DAQ). 86
Figura 14. Montaje preliminar del sistema DAQ durante las pruebas de integración. 87
Figura 15. Construcción del encapsulado definitivo del sistema DAQ.....87
Figura 16. Sistema DAQ ensamblado en su encapsulado. 88
Figura 17. Diagrama de flujo del proceso de inicialización del sistema (Setup). 90
Figura 18. Diagrama de flujo del proceso de adquisición y almacenamiento de datos (Loop). 91
Figura 19. Recorrido geográfico de la Ruta 1. 94
Figura 20. Perfil topográfico de la Ruta 1. 94

Figura 21. Perfil de voltaje de la Ruta 1 96
Figura 22. Perfil de corriente de la Ruta 1. 96
Figura 23. Perfil del estado de carga (SoC) en función de la distancia de la Ruta 1. 97
Figura 24. Perfil de la potencia instantánea de la Ruta 1. 97
Figura 25. Recorrido geográfico de la Ruta 2. 98
Figura 26. Perfil topográfico de la Ruta 2 con clasificación de la pendiente longitudinal..... 99
Figura 27. Perfil de voltaje de la Ruta 2. 100
Figura 28. Perfil de la demanda de corriente de la Ruta 2. 101
Figura 29. Perfil del estado de carga (SoC) en función de la distancia recorrida de la Ruta 2.. 101
Figura 30. Perfil de la potencia instantánea de la Ruta 2. 102
Figura 31. Perfil de la velocidad de la Ruta 2 102
Figura 32. Recorrido geográfico de la Ruta 3. 103
Figura 33. Perfil topográfico de la Ruta 3 con clasificación de la pendiente longitudinal..... 103
Figura 34. Perfil de voltaje de la Ruta 3 105
Figura 35. Perfil de corriente de la Ruta 3. 105
Figura 36. Perfil del estado de carga (SoC) en función de la distancia recorrida de la Ruta 3. 106
Figura 37. Perfil de la potencia instantánea de la Ruta 3. 106
Figura 38. Recorrido geográfico de la Ruta 4. 107
Figura 39. Perfil topográfico de la Ruta 4 con clasificación de la pendiente longitudinal..... 108
Figura 40. Perfil de voltaje de la Ruta 4. 109
Figura 41. Perfil de corriente de la Ruta 4. 110
Figura 42. Perfil del estado de carga (SoC) en función de la distancia de la Ruta 4. 110
Figura 43. Perfil de la potencia instantánea de la Ruta 4. 111
Figura 44. Recorrido geográfico de la Ruta 5. 112
Figura 45. Perfil topográfico de la Ruta 5 con clasificación de la pendiente longitudinal..... 112
Figura 46. Perfil de voltaje de la Ruta 5. 114

Figura 47. Perfil de corriente de la Ruta 5.....114

Figura 48. Perfil del estado de carga (SoC) en función de la distancia recorrida de la Ruta 5. 115

Figura 49. Perfil de la potencia instantánea de la Ruta 5. 115

Figura 50. Recorrido geográfico de la Ruta 6 117

Figura 51. Perfiles altimétricos de las pruebas de descarga profunda correspondiente a los tres niveles de velocidad.....118

Figura 52. Perfiles de voltaje en función de la distancia durante las pruebas de descarga profunda.....119

Figura 53. Perfiles de corriente en función de la distancia durante las pruebas de descarga profunda.....120

Figura 54. Perfiles del estado de carga en función de la distancia durante las pruebas de descarga profunda.....120

Figura 55. Perfiles de potencia instantánea en función de la distancia durante las pruebas de descarga profunda.....121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los vehículos eléctricos y sus principales características.....24
Tabla 2. Comparación de ventajas y limitaciones de los vehículos eléctricos [10]. 25
Tabla 3. Clasificación de las rutas de ensayo 43
Tabla 4. Especificaciones técnicas de la motocicleta Urvane Torino Racer 46
Tabla 5. Parámetros técnicos de referencia del motor eléctrico tipo hub.....47
Tabla 6. Parámetros técnicos operativos del controlador Wuxi Lingbo (serie LBMC) 48
Tabla 7. Especificaciones técnicas de la batería Tianneng TNE 12-25.....49
Tabla 8. Especificaciones técnicas del cargador inteligente del banco de baterías 51
Tabla 9. Especificaciones técnicas del convertidor DC/DC.....52
Tabla 10. Especificaciones técnicas del interruptor termomagnético. 53
Tabla 11: Materiales y equipos empleados durante la investigación 64
Tabla 12. Ficha técnica ESP32-WROOM-32U.....65
Tabla 13. Ficha técnica ACS758-050B 66
Tabla 14. Ficha técnica GPS u-blox NEO-M8N 67
Tabla 15. Ficha técnica Antena magnética GNSS.....67
Tabla 16. Ficha técnica MPU-9250.....68
Tabla 17. Ficha técnica DHT22.....69
Tabla 18. Ficha técnica DS18B20 69
Tabla 19. Ficha técnica BMP280.....70
Tabla 20. Ficha técnica ADS1115.....71
Tabla 21. Ficha técnica SSD1306 (OLED 128 x 64 px.) 72
Tabla 22. Ficha técnica módulo lector MicroSD.....72
Tabla 23. Ficha técnica del reductor XL4015 73
Tabla 24. Ficha técnica Power bank BIBOSHI.....74
Tabla 25. Software utilizado durante la investigación 74
Tabla 26. Distribución de los sensores externos del sistema DAQ en la motocicleta eléctrica. 89

Tabla 27. Validación experimental de las mediciones del sistema DAQ. 92
Tabla 28. Análisis de repetibilidad de la Ruta 1. 93
Tabla 29. Resultados de las variables analizadas en la Ruta 1. 95
Tabla 30. Resultados de las variables analizadas en la Ruta 2. 99
Tabla 31 Resultados de las variables analizadas en la Ruta 3 104
Tabla 32. Resultados de las variables analizadas en la Ruta 4 108
Tabla 33. Resultados de las variables analizadas en la Ruta 5 112
Tabla 34. Resultados de las variables analizadas en la Ruta 6 118
Tabla 35. Tabla comparativa de resultados de la Ruta 1 con pasajero 122
Tabla 36. Tabla comparativa de resultados de la Ruta 4 con pasajero 123

RESUMEN

Esta investigación analiza la autonomía y el consumo energético de una motocicleta eléctrica considerando la influencia de la topografía de las parroquias urbanas y periurbanas del cantón Ibarra. Para lo cual se diseñó, construyó e implementó un sistema de adquisición de datos (DAQ), que permitió registrar de forma sincronizada variables eléctricas, dinámicas, geográficas y ambientales en condiciones reales de conducción. Para las pruebas experimentales en campo se empleó una motocicleta eléctrica modelo Torino Racer, equipada con un motor de 1200 W y un banco de seis baterías AGM-Gel de 72 V y 25 Ah cada una. La metodología consistió en la ejecución de recorridos en seis rutas representativas con diferentes perfiles topográficos (tramos planos, ondulados y de ascenso continuo), además se evaluó el impacto de añadir carga extra al vehículo (conductor y acompañante).

Los datos analizados del DAQ demuestran que la topografía condiciona de manera significativa el desempeño de la motocicleta. En los recorridos con ascensos prolongados, la demanda de corriente alcanzó picos de 40 A, elevando el consumo específico de energía hasta 60.04 Wh/km y reduciendo su autonomía. En contraste, el uso del freno regenerativo en los descensos permitió la recuperación parcial de energía, alcanzando hasta 32.09 Wh en un circuito urbano mixto. La autonomía real de la motocicleta eléctrica difiere de los valores teóricos y depende directamente de las exigencias topográficas y operativas del entorno, factores indispensables a considerar en la planificación de la movilidad sostenible.

Palabras clave: Motocicleta eléctrica, autonomía, topografía, consumo energético, sistema de adquisición de datos, frenado regenerativo.

ABSTRACT

This research analyzes the driving range and energy consumption of an electric motorcycle, considering the influence of the topography in the urban and peri-urban parishes of the Ibarra canton. For this purpose, a data acquisition system (DAQ) was designed, built, and implemented to synchronously record electrical, dynamic, geographic, and environmental variables under real driving conditions. A Torino Racer electric motorcycle, equipped with a 1200 W motor and bank of six 72 V, 25 ah AGM-Gel batteries, was used for the experimental field tests. The methodology consisted of completing journeys along six representative routes with different topographic profiles (flat, undulating, and continuous ascent sections). Additionally, the impact of adding extra load to the vehicle (driver and passenger) was evaluated.

The data analyzed from the DAQ demonstrate that topography significantly influences the motorcycle's performance. On routes with prolonged ascents, the current demand reached peaks of 40 A, increasing the specific energy consumption to 60.04 Wh/km and reducing the vehicle's range. In contrast, the use of regenerative braking during descents allowed for partial energy recovery, reaching up to 32.09 Wh in a mixed urban circuit. The actual range of the electric motorcycle differs from theoretical values and depends directly on the topographic and operational demands of the environment, which are essential factors to consider when planning sustainable mobility.

Keywords: Electric motorcycle, range, topography, energy consumption, data acquisition system (DAQ), regenerative braking.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Tema: Análisis de la autonomía de una motocicleta eléctrica considerando la topografía de las parroquias urbanas del cantón Ibarra.

1.1 Problema de investigación

1.1.1 Problemática a investigar

En el cantón Ibarra, especialmente en las parroquias urbanas, se ha observado un aumento del uso de motocicletas eléctricas como alternativa de movilidad sostenible. Sin embargo, su rendimiento real, en particular en cuanto a la autonomía, está condicionado por factores topográficos, operativos y ambientales cuya influencia aún no ha sido evaluada en las condiciones propias de la región.

La autonomía efectiva de una motocicleta eléctrica puede variar significativamente según la topografía de la vía. Asimismo, factores operativos como la carga transportada, la velocidad de conducción y las condiciones climáticas inciden directamente en el consumo energético del vehículo. En particular, la topografía de las vías, la densidad del aire y la temperatura ambiente pueden afectar la eficiencia de la batería y el rendimiento del motor eléctrico.

A pesar del crecimiento del uso de motocicletas eléctricas en Ibarra, existen muy pocos estudios que analicen de manera integral cómo las condiciones operativas y la topografía influyen en su autonomía. La falta de información técnica impide conocer con precisión el comportamiento real de estos vehículos en las distintas vías del cantón, dificultando la optimización de su uso y desempeño.

1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación

¿De qué manera la topografía y las condiciones de operación influyen en el consumo energético y la autonomía de una motocicleta eléctrica en el cantón Ibarra?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Analizar la autonomía de una motocicleta eléctrica considerando la topografía de las parroquias urbanas del cantón Ibarra, mediante recorridos en rutas de ensayo con la finalidad de recolectar información de su comportamiento.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Describir las tecnologías en las cuales se basa la movilidad eléctrica en motocicletas.
2. Desarrollar una metodología que permita medir el desempeño del sistema eléctrico de la motocicleta considerando la topografía de las parroquias urbanas del cantón Ibarra.
3. Evaluar la autonomía de la motocicleta eléctrica en el cantón Ibarra.

1.3 Alcance de la investigación

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad estudiar la autonomía de una motocicleta eléctrica en el cantón Ibarra, considerando las condiciones topográficas y operativas del entorno urbano. Para ello, se llevará a cabo una revisión, recopilación y análisis de la literatura técnica y científica relacionada con la movilidad eléctrica, con el propósito de identificar las principales tecnologías que conforman los sistemas de propulsión, almacenamiento de energía y control en motocicletas eléctricas.

A partir del análisis bibliográfico, se desarrollará una metodología que permita evaluar el desempeño del sistema eléctrico de la motocicleta en función de las características topográficas de las parroquias urbanas del cantón Ibarra. Dicha metodología abarcará la elección de los trayectos de prueba y la monitorización constante de parámetros eléctricos y del entorno (voltaje, corriente, estados de carga de la batería, velocidad, aceleración, temperatura de la batería, temperatura ambiental, humedad relativa, posición geográfica, altitud y presión atmosférica).

Posteriormente, se aplicará la metodología propuesta mediante pruebas experimentales en condiciones reales de conducción, considerando variaciones en el peso total del conjunto, con el fin de analizar su efecto sobre la autonomía. Cada ensayo se iniciará con la batería

totalmente cargada, manteniendo constantes las condiciones de preparación y registro de datos. Las pruebas se realizarán en diferentes escenarios de velocidad promedio, condiciones climáticas y niveles de tráfico urbano, de manera que se analice la influencia conjunta de estos factores sobre el comportamiento y la autonomía de la motocicleta eléctrica.

Las rutas seleccionadas para el desarrollo experimental se ubican dentro del entorno urbano del cantón Ibarra y fueron definidas considerando criterios de accesibilidad, seguridad, topografía y representatividad del tráfico.

Ruta 1 - Circuito urbano corto: inicia en Av. 17 de Julio, siguiendo por la calle Aurelio Espinosa Pólit, Juan José Flores, Pedro Vicente Maldonado, Cristóbal Colón, Av. Eugenio Espejo, Av. Alfredo Pérez Guerrero, C. Darío Egas Grijalva, Av. Fray Vacas Galindo, Av. Teodoro Gómez de la Torre, Heleodoro Ayala, José Tobar, Av. Camilo Ponce Enríquez, Carretera Panamericana (E35), Cristóbal de Troya, Gral. José María Córdova, regresando finalmente a la Av. 17 de Julio.

Ruta 2 - Media distancia con topografía levemente ondulada: inicia en Av. 17 de julio, continuando por Av. Padre Aurelio Espinosa Polit, Carlos Barahona, Tahuando, Av. El Retorno, hasta empalmar con Galo Plazo Lasso y continuar por la vía a Olmedo hasta el Paradero La Esperanza.

Ruta 3 - Pendientes suaves a moderadas y tráfico urbano intermedio: inicia en Av. 17 de julio, tomando la vía a Yuracrucito, Vía Arcángel, Vía Olivo Alto, Dr. Agustín Cueva, Av. José Tobar y Tobar, Gabriela Mistral, salida Laguna de Yahuarcocha, Carretera Panamericana/E35, y Puruhanta, finalizando en Pimán dentro de la Parroquia del Priorato.

Ruta 4 – Desplazamiento hacia Caranqui: inicia en Av. 17 de Julio, Dr. Luis Madera, Carretera Panamericana (E35), Av. Camilo Ponce Enríquez, Av. Ricardo Sánchez, calle Hernán Gonzales de Saa y Av. Atahualpa, finalizando en el polideportivo de Caranqui.

Ruta 5 - Corredor Periférico (Anillo Vial – San Antonio): inicia en Av. 17 de Julio, siguiendo por la Av. Dr. Luis Madera, Carretera Panamericana (E35), Av. Cristóbal de Troya, Av. Mariano Acosta y 27 de noviembre, hasta llegar al Polideportivo de San Antonio.

Ruta 6 – Trayecto Cerrado – Borde Lacustre de Yahuarcocha: inicia en el Paseo Yahuarcocha, recorriendo todo el contorno de la laguna a través de la Av. José Tobar y Tobar y Gabriel Mistral regresando finalmente al punto de partida.

La investigación se limitará a un solo modelo de motocicleta eléctrica y se enfocará en rutas accesibles dentro del cantón Ibarra, sin considerar comparaciones con otros modelos, evaluaciones de tipo económico ni pruebas de laboratorio.

1.4 Justificación

La movilidad eléctrica se ha posicionado como una solución sostenible ante los desafíos ambientales asociados al uso de combustibles fósiles en el transporte. Dentro de este marco, las motocicletas eléctricas representan una opción para la movilidad urbana, al reducir emisiones contaminantes y optimizar el uso de la energía.

Para aprovechar plenamente sus ventajas, es necesario analizar su comportamiento en condiciones reales de operación, considerando los factores que influyen en su desempeño. En el cantón Ibarra, la topografía variable, las diferencias de altitud y las condiciones climáticas pueden influenciar significativamente la autonomía de estos vehículos, por lo que su estudio experimental resulta esencial.

Esta investigación tiene como finalidad aportar información técnica que permita comprender cómo las distintas condiciones topográficas influyen en la autonomía de una motocicleta eléctrica, generando datos experimentales que puedan contrastarse con los valores teóricos o de fábrica. Esto representa un aporte relevante, ya que actualmente no existen muchos estudios locales enfocados específicamente en motocicletas eléctricas, pese al crecimiento de su uso en la región.

El estudio destaca por su carácter aplicado y su viabilidad técnica y económica. La motocicleta y los equipos de medición han sido adquiridos con recursos propios del investigador, garantizando la ejecución independiente del estudio y el control total sobre los datos recolectados. De este modo, el proyecto contribuirá tanto al conocimiento académico como al fortalecimiento del desarrollo tecnológico y ambiental del cantón.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

A nivel nacional e internacional se han desarrollado diversas investigaciones orientadas a analizar el desempeño y la autonomía de los vehículos eléctricos en distintos contextos urbanos.

En Europa, la movilidad eléctrica ha ganado impulso como respuesta a la necesidad de reducir el impacto ambiental del transporte. La implementación de medios de transporte electrificados, sumada a la creación de redes de recarga y su articulación con alternativas ecológicas, representa un pilar fundamental en la modernización de las ciudades [1]. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la autonomía y la infraestructura de carga. En un estudio reciente, Mao et al. (2025) analizaron los factores que influyen en la autonomía de los vehículos eléctricos, clasificándolos en dimensiones técnicas, ambientales, económicas, políticas, culturales y relacionadas con el usuario. Entre los factores técnicos más influyentes se destacan la capacidad de la batería, el peso del vehículo, la aerodinámica y la tecnología de recarga. Asimismo, comprobaron que las condiciones ambientales y geográficas pueden reducir la autonomía real del vehículo. Los autores concluyen que la autonomía no debe analizarse solo desde una perspectiva técnica, sino mediante un enfoque integral que considere las condiciones reales de operación, especialmente útil para entornos como las ciudades de altura [2].

En este contexto, a nivel nacional, se han desarrollado investigaciones que buscan adaptar los hallazgos internacionales a las condiciones locales. Un ejemplo representativo es el estudio realizado por Anrango y Saguay (2025), en el cual diseñaron un ciclo de conducción adaptado a las condiciones de altitud y tráfico. Los resultados permitieron simular la eficiencia energética y la autonomía real de vehículos de combustión interna (ICEV), eléctricos (EV) y de celdas de hidrógeno (FCEV), demostrando que la altitud y las características del tráfico influyen significativamente en el desempeño de los vehículos [3].

En el ámbito de los vehículos eléctricos de dos ruedas, se han desarrollado estudios que analizan su autonomía mediante la recopilación de datos de ruta, el cálculo del consumo

energético y el uso de simulaciones computacionales para aproximar su comportamiento en condiciones de operación. En este sentido, Guachichulca y Zhunio (2023) realizaron un estudio orientado a analizar la autonomía de la motocicleta eléctrica Venus 2.0 en tres tipos de recorrido (urbano, autopista y mixto) en la ciudad de Cuenca. Para recopilar datos de ruta usaron la aplicación Komoot, registrando distancia, velocidades, elevación y tiempo estimado. Posteriormente, los autores aplicaron un modelo de simulación en MATLAB, complementado con Python para procesar el perfil de elevación, con el fin de comparar los resultados simulados con las pruebas reales. Si bien los valores simulados y los observados tuvieron una aproximación aceptable, los autores indicaron que el modelo no contempla todas las condiciones de conducción, por lo que recomendaron realizar más pruebas en distintos escenarios para mejorar la precisión de los resultados [4].

Rosas y Trujillo (2023) evaluaron la autonomía de la motocicleta eléctrica Super Soco TC Max en condiciones reales de operación en la ciudad de Ibarra. Para ello, realizaron una prueba Coast-Down en el autódromo de Yahuarcocha para determinar el coeficiente aerodinámico y otros parámetros cinemáticos del vehículo. Además, trazaron tres rutas representativas (urbana, real y autopista) utilizando una matriz origen-destino basada en el plan de movilidad de la ciudad, sobre las cuales registraron datos con dos datalogger a 1 Hz y variables ambientales como humedad mediante higrómetro. Con estos datos, desarrollaron un modelo de simulación en MATLAB basado en la potencia de tracción y la eficiencia, que permitió estimar la autonomía en función de la energía consumida en la rueda. Los resultados mostraron una autonomía teórica de 110 km frente a una autonomía real de 75,72 km [5]. No obstante, es importante señalar que dicho estudio priorizó la definición de un ciclo de conducción basado en patrones de movilidad social (origen-destino) para validar modelos predictivos de simulación. A diferencia de esa aproximación, la presente investigación se centra en la caracterización energética directa (in situ) de una tecnología de almacenamiento distinta (Plomo-Ácido regulada por válvula VRLA/AGM-Gel), enfocándose específicamente en medir la degradación de la autonomía bajo condiciones de estrés topográfico severo, más allá de la estandarización de ciclos de manejo.

A partir de los antecedentes revisados, se evidencia la necesidad de fundamentar el análisis de la autonomía desde una base teórica que integre los principios de la movilidad eléctrica, las tecnologías asociadas a las motocicletas eléctricas y los factores energéticos que condicionan su desempeño en condiciones reales de operación.

2.2 Movilidad Eléctrica

2.2.1 Concepto y evolución de la movilidad eléctrica

Se define como el grupo de tecnologías de transporte que utilizan la energía eléctrica como propulsión, incluyendo desde trenes y autobuses hasta automóviles y vehículos de transporte personal [6].

Los vehículos eléctricos nacieron en la década de 1830 y se popularizaron por primera vez en la década de 1890, destacando por ser silenciosos y fáciles de usar frente a los autos de combustión interna. Tuvieron su auge a inicios del siglo XX, pero luego perdieron mercado ante el avance de los motores de combustión.

En los años 60 y 70 por la crisis del petróleo y la contaminación, aunque cayó otra vez por su baja autonomía. En los 90 surgieron por regulaciones ambientales, con modelos clave como el GM EV1 y el Toyota Prius, y más tarde Tesla impulsó la era moderna con mejoras en baterías e infraestructura de carga.

Actualmente, la electrificación es tendencia global y muchos fabricantes planean reducir o eliminar la combustión hacia la década de 2030 [7].

En Ecuador, al igual que en muchos otros países, la preocupación ambiental ha motivado al impulso de alternativas sostenibles. En el ámbito local se han implementado incentivos fiscales y municipales, y tanto el sector público como el privado han invertido en infraestructura de carga, favoreciendo el uso de vehículos eléctricos [8]. Según datos de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), en el año 2025 se han vendido 2.718 vehículos híbridos y eléctricos, frente a las 959 unidades del mismo período en 2024, alcanzando una participación del 3,1% en el mercado [9]. Estas cifras evidencian que, en los últimos años, la movilidad eléctrica en Ecuador ha tomado mayor impulso, reflejándose en un aumento en la adopción de vehículos eléctricos en el país.

2.2.2 Clasificación de los vehículos eléctricos

En la Tabla 1 se detalla la clasificación tecnológica de los vehículos eléctricos, categorizados en función de su arquitectura de propulsión, fuente de energía y requerimientos de carga.

Tabla 1. Clasificación de los vehículos eléctricos y sus principales características

Tipo de vehículo	Descripción	Fuente de energía	Carga Externa
HEV (vehículo eléctrico híbrido)	Usa un motor tradicional de gasolina mejorado con uno eléctrico, cargado con la energía generada por el primero.	Mezcla carburante y electricidad	Sistema cerrado, no se enchufa
PHEV (vehículo Eléctrico Híbrido Enchufable)	Características similares a las del HEV, con la diferencia de que puede recargarse externamente.	Uso combinado(gasolina y electricidad externa)	Sí, admite conexión a la red
BEV (Vehículo Eléctrico de Batería)	Utiliza exclusivamente energía eléctrica almacenada en baterías de alta capacidad.	Energía eléctrica	Sí requiere
FCEV (Vehículo Eléctrico de Célula de Combustión)	Utiliza una pila de combustible para generar electricidad a partir de hidrógeno, que luego alimenta el motor eléctrico.	Hidrógeno, almacenado en un tanque	No requiere, se recarga con hidrógeno
EREV (Vehículo Eléctrico de Autonomía Extendida)	Vehículo eléctrico con motor auxiliar que recarga la batería, pero no mueve el auto directamente.	Electricidad (batería) y combustible fósil para el generador	Sí, se enchufan para recargar la batería

Fuente: Adaptado de [10], [11].

2.2.3 Ventajas y limitaciones de los vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos representan una alternativa cada vez más relevante en el transporte por su alta eficiencia energética y menor impacto ambiental; sin embargo, su desempeño real puede variar significativamente según las condiciones de operación y el entorno. En la Tabla 2 se hace una comparativa con sus principales ventajas y limitaciones.

Tabla 2. Comparación de ventajas y limitaciones de los vehículos eléctricos [10].

Aspecto	Ventajas de los vehículos eléctricos (VE)	Limitaciones de los vehículos eléctricos (VE)
Ambiental	Reduce las emisiones de gases contaminantes; mejora la calidad del aire.	Producción y reciclaje de baterías; consumen recursos y pueden generar impacto ambiental.
Autonomía	Capacidad de recuperar energía mediante sistemas de freno regenerativo.	Autonomía limitada; necesita mejoras para ser comparable a combustibles convencionales.
Energético	Los vehículos eléctricos convierten más del 77% de la energía eléctrica de la red en energía para las ruedas.	Dependencia de la red eléctrica; la demanda aumenta con más vehículos.
Confort	Reduce el ruido en las ciudades (contaminación acústica).	La ausencia casi total de ruido mecánico puede representar un riesgo de seguridad para peatones distraídos.
Económico	Menor costo de mantenimiento que los vehículos de combustión.	Alto costo de adquisición inicial.
Operativo	Motores progresivos sin embrague ni caja; buen rendimiento a bajas revoluciones.	- Rendimiento de baterías afectado por la temperatura. - Vida útil limitada. - Requieren reemplazo.
Infraestructura	Flexibilidad operativa al permitir la recarga doméstica mediante tomacorrientes convencionales.	Red de carga limitada; requiere sistemas de recarga rápida y electrolineras públicas.
Tiempo de recarga	Posibilidad de aprovechar los tiempos de inactividad prolongada (recarga nocturna en casa).	Tiempos de carga más largos que el repostaje de combustibles convencionales en estaciones de servicio.

Fuente: Adaptado de [10].

2.2.4 Normativas y políticas de electromovilidad en Ecuador

En Ecuador, la adopción de vehículos eléctricos se impulsa mediante políticas e incentivos como la exoneración del IVA y del Impuesto Verde, créditos verdes con tasas preferenciales, exención de pico y placa en Quito, gratuidad en estacionamientos públicos y medidores especiales para recarga domiciliaria, lo que hace más competitiva la movilidad eléctrica frente a los vehículos convencionales [8].

2.2.5 La motocicleta eléctrica como eje de la movilidad urbana

Los vehículos eléctricos de dos ruedas se han consolidado como una de las vías más accesibles para la adopción de la electromovilidad en entornos urbanos, mostrando además menores costos operativos y un bajo consumo energético en comparación con los automóviles convencionales. Su implementación puede avanzar incluso con infraestructura pública de carga limitada, ya que muchos modelos incorporan baterías extraíbles que permiten la recarga domiciliaria mediante tomas convencionales [12].

Para evaluar su impacto y desempeño energético, resulta útil distinguir entre la eficiencia "tank-to-wheel", que expresa qué proporción de la energía suministrada al vehículo se convierte en energía útil en las ruedas, y la eficiencia "well-to-tank", que representa la energía primaria requerida para producir y entregar la energía que finalmente recibe el vehículo. En conjunto, estas características refuerzan su potencial para contribuir a la reducción de emisiones locales y a la mejora de la calidad del aire [13].

2.3 Fundamentos de la autonomía

La autonomía se define como la distancia máxima que el vehículo es capaz de recorrer aprovechando exclusivamente la capacidad energética disponible en su sistema de almacenamiento [14]. Este parámetro constituye un indicador fundamental para evaluar el desempeño de la motocicleta, ya que establece los límites operativos de desplazamiento antes de requerir un nuevo ciclo de carga. En la práctica comercial, el rango de desplazamiento promedio para este segmento de vehículos oscila entre los 50 y 150 kilómetros [15].

2.3.1 Factores que afectan la autonomía

En un entorno de conducción real, la autonomía de la motocicleta está condicionada por múltiples variables físicas y operativas que alteran el consumo de energía durante el trayecto.

Influencia de la pendiente y altitud

En zonas de gran altitud, la menor densidad del aire reduce la capacidad de refrigeración del motor y de la electrónica de potencia. Durante el ascenso en pendientes pronunciadas, el aumento del par requerido incrementa la demanda de corriente, lo que acelera la descarga de la batería y reduce su autonomía [16]. Este efecto se intensifica en ciudades de altura, donde las

condiciones térmicas y topográficas hacen que la autonomía real sea inferior a la especificada por el fabricante.

Factores relacionados con el vehículo y la batería

Los principales factores relacionados con el vehículo y la batería que influyen en la autonomía se describen a continuación:

- ***Capacidad de la batería***

Constituye el factor principal. A mayor capacidad (medida en kWh o Ah), mayor será la autonomía.

- ***Eficiencia del motor***

Un motor más eficiente consume menos energía para generar la misma potencia, optimizando el uso de la batería.

- ***Peso y carga***

El peso que transporta la motocicleta (conductor y acompañante) impacta directamente en la energía necesaria para moverse. El incremento de masa total transportada eleva la demanda energética del sistema de tracción, reduciendo la autonomía disponible.

- ***Estado de la batería***

Con el tiempo y el uso, la capacidad de la batería disminuye, lo que reduce la autonomía. El mantenimiento adecuado y el uso de cargadores apropiados son cruciales para prolongar su vida útil.

Factores relacionados con la conducción y el entorno

Además de las características propias del vehículo, existen factores asociados a la conducción y al entorno que influyen directamente en la autonomía, entre ellos:

- ***Estilo de conducción***

Aceleraciones bruscas y velocidades elevadas consumen mucha más energía. Los perfiles de conducción caracterizados por aceleraciones moderadas y velocidades estables presentan menores demandas instantáneas de potencia, lo que se traduce en una mejora de la eficiencia energética del vehículo.

- ***Velocidad***

  Cuanto más rápido se circula, mayor es la resistencia del aire y el consumo de energía.

- ***Topografía del terreno***

  Conducir cuesta arriba requiere más potencia del motor y, por tanto, más energía.

- ***Temperatura***

Las temperaturas extremas (muy altas o muy bajas) pueden afectar el rendimiento y la eficiencia de la batería.

- ***Mantenimiento general***

Neumáticos con la presión correcta y un buen estado general del vehículo minimizan la resistencia a la rodadura y mejoran la eficiencia [17].

Dada la variabilidad que introducen estos factores en un escenario de conducción real, resulta complejo establecer un valor de autonomía único y definitivo. Por esta razón, el análisis riguroso de la autonomía requiere la medición simultánea de variables eléctricas, operativas y ambientales durante la conducción, lo cual se logra mediante sistemas de adquisición de datos aplicados en pruebas de campo.

2.3.2 Medición estandarizada de la autonomía (Ciclos de Conducción)

Para la homologación de motocicletas eléctricas, la normativa internacional establece el uso del Ciclo Mundial de Prueba de Motocicletas (WMTC), definido en el Reglamento Técnico Mundial No. 2 (GRT No. 2). Este procedimiento consiste en someter al vehículo a una secuencia predefinida de aceleraciones, velocidades constantes y desaceleraciones sobre un dinamómetro de chasis, simulando la conducción en tres fases: urbana (baja velocidad), rural y de autopista. El objetivo del WMTC es proporcionar un valor de consumo y autonomía reproducible y comparable entre distintos modelos. Sin embargo, dado que la prueba se realiza en una superficie plana y bajo condiciones ambientales controladas, el resultado obtenido representa un escenario idealizado. Este valor no refleja el incremento de consumo energético que ocurre al enfrentar la resistencia por pendiente en geografías montañosas como la de Ibarra, lo que hace indispensable la validación mediante pruebas de campo [18].

2.4 Tecnologías asociadas a las motocicletas eléctricas

Las motocicletas eléctricas combinan diversos sistemas tecnológicos que permiten su funcionamiento eficiente y seguro. Estos incluyen el almacenamiento de energía en baterías, los motores eléctricos, los sistemas de gestión de la batería (BMS) y los controladores de electrónica de potencia. Conocer estas tecnologías es fundamental para analizar su rendimiento, autonomía y eficiencia, así como para comprender los desafíos asociados a su operación y desarrollo.

2.4.1 Sistema de almacenamiento de energía

Un sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) es un dispositivo electroquímico que permite almacenar energía eléctrica en forma de energía química y liberarla cuando se la requiere [19]. En el área de los vehículos eléctricos, este proceso se basa en reacciones de oxidación-reducción que ocurren durante los ciclos de carga y descarga de la batería.

Durante la descarga, la energía química almacenada se transforma en energía eléctrica disponible para el sistema de tracción del vehículo, mientras que en la carga el proceso se invierte, restaurando la energía química interna. Gracias a este principio de funcionamiento, las baterías empleadas en vehículos eléctricos pueden alcanzar eficiencias energéticas cercanas al 97%, valor significativamente superior al rendimiento promedio de los motores de combustión interna, que se sitúa alrededor del 20%, lo que evidencia su ventaja en aplicaciones de transporte [20].

Los mecanismos internos responsables de estos procesos electroquímicos se analizan a nivel de celda, que constituye la unidad básica de almacenamiento energético dentro de una batería.

Celdas electroquímicas

La celda electroquímica es la unidad fundamental de la batería y es responsable directa del almacenamiento y liberación de energía eléctrica mediante reacciones electroquímicas. Cada celda está compuesta por un ánodo, un cátodo y un electrolito, el cual permite el transporte de iones entre ambos electrodos, mientras que el flujo de electrones se produce a través del circuito

externo. Un separador se encarga de garantizar la estabilidad física del sistema y evitar el contacto directo entre los electrodos previniendo cortocircuitos internos [21][22].

Según su funcionamiento, las celdas pueden clasificarse en primarias, secundarias y celdas de combustible, estas últimas operan mediante reactivos suministrados externamente y no son consideradas baterías en sentido estricto. [21].

Tipos de baterías

Para el funcionamiento de las motocicletas eléctricas, existen diferentes tecnologías de baterías disponibles en la actualidad. Cada una de ellas posee propiedades químicas distintas que determinan el rendimiento, el peso y la capacidad de entrega de energía al vehículo. A continuación, se describen las baterías más usadas en movilidad eléctrica de dos ruedas.

- ***Baterías de Ion Litio***

Se han consolidado como la tecnología predominante en aplicaciones de movilidad eléctrica de alto rendimiento debido a su elevada densidad energética y eficiencia de carga. Según Quintero et al. (2021), estas celdas permiten almacenar mayor cantidad de energía en menor volumen y peso en comparación con tecnologías predecesoras, aunque requieren sistemas de gestión electrónica (BMS) estrictos para monitorear su Estado de Salud (SOH) y evitar degradación prematura por condiciones térmicas adversas [23].

- ***Baterías LiFePO4 (fosfato de hierro y litio)***

Esta tecnología se distingue por su alta seguridad y estabilidad térmica, siendo menos propensa a la fuga térmica (incendio) que otras variantes de litio, además de ser más ecológica por la ausencia de cobalto. Esta tecnología se caracteriza por una elevada estabilidad térmica y una vida útil prolongada, alcanzando del orden de 2000 a 3000 ciclos de carga y descarga bajo condiciones operativas controladas. No obstante, su implementación enfrenta desafíos técnicos: poseen una menor densidad energética (mayor peso y volumen que las baterías NMC) y presentan una caída de rendimiento en climas fríos, lo que complica su uso en motocicletas deportivas donde la ligereza es prioritaria [24].

- ***Baterías de grafeno***

Según Tycorun Energy (2025), las baterías denominadas "baterías de grafeno" en el mercado de motocicletas no están compuestas íntegramente de este material, sino que integran grafeno en la estructura de los electrodos de las baterías tradicionales para potenciar su rendimiento. El grafeno, compuesto por una monocapa de átomos de carbono con estructura hexagonal, aporta una alta conductividad eléctrica y térmica al sistema. Al incorporarse en la placa negativa, crea una red conductora que facilita el movimiento rápido de iones, reduciendo la resistencia interna y optimizando la eficiencia de los procesos de carga y descarga frente a las baterías convencionales [25].

- ***Baterías Plomo-Ácido/AGM***

Dentro de la familia de baterías de plomo-ácido selladas (VRLA), existen dos tecnologías predominantes: Gel y AGM (Absorbent Glass Mat). La tecnología de Gel utiliza sílice para inmovilizar el electrolito en forma de pasta, ofreciendo un rendimiento estable hasta el final de su vida útil, aunque a un costo elevado. Por su parte, la tecnología AGM suspende el electrolito en una malla de fibra de vidrio; esta variante es la más idónea para motocicletas y aplicaciones de tracción ligera debido a su capacidad para admitir cargas rápidas y entregar altas corrientes instantáneas bajo demanda.

A diferencia de las baterías inundadas, las VRLA requieren un control estricto de voltaje para evitar la gasificación y la consecuente pérdida de agua (desecación). Asimismo, son técnicamente sensibles, su temperatura óptima de operación es de 25 °C, y se estima que la vida útil se reduce a la mitad por cada incremento de 8°C sobre este umbral. Según su aplicación, se clasifican en tres categorías: arranque (automotriz), estacionaria (SAI) y fuerza motriz (ciclo profundo), siendo esta última la utilizada en vehículos eléctricos [26].

- ***Baterías de Ion de Sodio (Na+)***

Son sistemas electroquímicos en dónde los iones de sodio se desplazan entre el ánodo y el cátodo a través de un electrolito durante los procesos de carga y descarga, siguiendo un principio de funcionamiento similar al de las baterías de iones de litio. Esta tecnología ha sido estudiada como una alternativa al litio debido a la abundancia del sodio y a su menor

dependencia de materiales críticos, lo que la convierte en una opción prometedora para sus aplicaciones de almacenamiento energético sostenible [27].

No obstante, las baterías de iones de sodio presentan una menor densidad energética y menor voltaje nominal en comparación a las baterías de litio, lo cual se atribuye principalmente al mayor radio iónico y a la menor capacidad gravimétrica del sodio. Debido a estas limitaciones, su uso en aplicaciones que requieren alta densidad energética es restringido; sin embargo, resultan especialmente atractivas para sistemas de almacenamiento estacionario de energía y aplicaciones donde el costo, la seguridad y la disponibilidad de materia prima son factores determinantes [28].

Independientemente de la tecnología empleada, el desempeño de una batería en aplicaciones de movilidad eléctrica se evalúa mediante un conjunto de parámetros eléctricos, energéticos y térmicos que permiten cuantificar su comportamiento durante los procesos de carga y descarga. Estos parámetros constituyen la base para el análisis experimental del consumo energético y la autonomía del vehículo, y resultan fundamentales para interpretar los datos obtenidos en condiciones reales de operación.

Parámetros técnicos

Según [29], los principales parámetros que caracterizan el comportamiento de las baterías son los siguientes:

- ***Voltaje de batería:*** Es la diferencia de potencial eléctrico entre los terminales de la celda, determinada por la diferencia entre los potenciales electroquímicos del ánodo y del cátodo.
- ***Tensión en circuito abierto (OCV):*** Representa el voltaje de la batería cuando se encuentra en reposo, es decir, sin estar conectada a ningún circuito de carga.
- ***Voltaje teórico o estándar:*** Corresponde al voltaje esperado de la batería según los materiales de sus electrodos, calculado a partir de los potenciales estándar de cada electrodo.
- ***Capacidad de carga:*** Indica la cantidad de carga eléctrica que la batería puede almacenar, expresada en amperios-hora (Ah).
- ***Capacidad eléctrica:*** Se refiere a la energía total que la batería puede suministrar, expresada en watt-hora (Wh), resultado del producto entre voltaje nominal y capacidad en Ah.

- ***Resistencia interna:*** Es la oposición que presenta la celda al paso de la corriente eléctrica debido a sus propias propiedades materiales.
- ***Corriente:*** Es la cantidad de carga eléctrica que fluye por la batería por unidad de tiempo, medida en amperios (A). También puede expresarse en relación con la capacidad de la batería.
- ***Corriente máxima de carga o descarga:*** Es el valor máximo de corriente al que la batería puede ser cargada o descargada de manera segura, según las recomendaciones del fabricante.
- ***Corriente o índice de autodescarga:*** Representa la porción de carga que se pierde de forma natural incluso cuando la batería no está en uso.
- ***Energía total:*** Es la cantidad de energía que la batería puede suministrar, determinada por su voltaje, la corriente aplicada durante la descarga y la capacidad de carga disponible.
- ***Energía específica:*** Es la cantidad de energía que una batería puede entregar por unidad de masa, determinada por su voltaje y capacidad nominal.
- ***Densidad de energía:*** Es la cantidad de energía que una batería puede entregar por unidad de volumen, determinada por su voltaje y capacidad nominal. Este parámetro constituye una de las principales ventajas de las baterías de litio.
- ***Potencia específica:*** Es la máxima potencia que puede proporcionar una batería en relación con su masa.
- ***Intervalo térmico de trabajo:*** Es el rango de temperaturas en el que la batería puede funcionar correctamente.
- ***Eficiencia en régimen de carga o descarga:*** Indica qué porcentaje de la energía que la batería recibió puede entregar luego, es decir, cuánta energía útil se obtiene en comparación con la que se almacenó.
- ***Estado de carga (SoC):*** Representa la energía disponible en la batería en relación con su capacidad total, expresado en porcentaje.
- ***Profundidad de descarga (DOD):*** indica qué parte de la capacidad total de la batería se ha usado, siendo el complementó del estado de carga.

- ***Estado de salud (SoH):*** Refleja la condición actual de la batería y cuánta de su capacidad original aún puede entregar.
- ***Ciclos permitidos y reales de descarga (n):*** Indica la cantidad de ciclos de carga y descarga que la batería puede soportar según su diseño, aunque en la práctica rara vez coinciden con los que realmente se llegan a realizar.
- ***Consumo específico (Wh/km):*** Es la relación entre la energía que la batería entrega y la que necesita para recargarla, afectada por la rapidez de carga y el patrón de descarga.

En aplicaciones experimentales in situ, parámetros como la resistencia interna y el estado de salud de la batería no siempre se miden de forma directa, sino que se infieren a partir del comportamiento del voltaje, la corriente, y la temperatura durante los procesos de descarga.

Curvas de descarga y efecto C-Rate

La curva de descarga es la representación gráfica fundamental del comportamiento de una batería, donde se visualiza la disminución del Voltaje Terminal (Vt) en función de la capacidad entregada o el Estado de Carga (SoC). Esta curva no es lineal, sino que está determinada por tres factores de polarización: la caída óhmica (IR Drop) causada por la resistencia interna, la polarización de activación (cinética electroquímica) y la polarización de concentración (transporte de iones)[30].

2.4.2 Sistema de gestión de baterías (BMS)

Este sistema es el componente electrónico inteligente que actúa como el “cerebro” del sistema de almacenamiento. Su función principal es supervisar y controlar los parámetros operativos de las celdas en tiempo real, calculando los límites de corriente seguros para la carga y descarga. Este monitoreo previene condiciones críticas como el sobrevoltaje, el bajo voltaje (descarga profunda) y las temperaturas extremas, factores que podrían degradar irreversiblemente la química interna o provocar riesgos de seguridad como fugas térmicas [31].

Funciones de monitorización y estimación de estado

El BMS regula continuamente parámetros físicos como voltaje, corriente y temperatura. A partir de estos valores, ejecuta algoritmos para estimar el estado interno de la batería. En este proceso, destacan dos indicadores fundamentales:

- ***Estado de Carga (SOC)***

Indica la energía remanente disponible. El BMS utiliza métodos como el "conteo de culombios" (integración de corriente) o filtros de Kalman adaptivos para calcular este valor con precisión, superando las limitaciones de la medición de voltaje [32].

- ***Estado de salud (SOH)***

Refleja la condición general de la batería (pérdida de capacidad y aumento de resistencia interna) en comparación con su estado original de fábrica, permitiendo predecir el final de su vida útil [32].

Equilibrado de celdas (Cell Balancing)

Debido a variaciones inevitables en la fabricación o condiciones térmicas, las celdas individuales de un paquete tienden a desequilibrarse con el tiempo, donde algunas alcanzan la carga completa antes de otras. El BMS mitiga este problema mediante dos técnicas:

- ***Equilibrado Pasivo***

Disipa el exceso de energía de las celdas más cargadas en forma de calor a través de resistencias, permitiendo que las celdas más bajas se igualen.

- ***Equilibrado Activo***

Transfiere energía de las celdas con mayor carga hacia las de menor carga mediante condensadores o inductores, optimizando la eficiencia energética del sistema [32].

Gestión térmica y de potencia

El sistema regula los procesos de carga mediante algoritmos de Corriente Constante/Voltaje Constante (CC-CV) para prevenir sobrecorrientes. Simultáneamente, realiza una gestión térmica activa; dado que las temperaturas extremas degradan la química de la celda o reducen su capacidad, el BMS monitorea los límites térmicos para mantener la batería en un rango operativo óptimo, activando protocolos de protección o desconexión en caso de detectar riesgo de fuga térmica [32]

2.4.3 Motor eléctrico

El motor eléctrico es una máquina que convierte la energía suministrada por la batería en energía mecánica destinada a la tracción de las ruedas, mediante principios

electromagnéticos. Al pasar corriente por los devanados del estator, se genera un campo magnético giratorio que interactúa con el rotor, produciendo su movimiento de rotación. Este movimiento se transmite directamente a las ruedas, prescindiendo de sistemas complejos de transmisión como la caja de cambios [33].

Para entender el desempeño de un motor eléctrico, es fundamental analizar sus principales parámetros, los cuales describen cómo se genera y transmite la fuerza, la velocidad a la que gira el eje, la cantidad de trabajo que realiza y la eficiencia con la que convierte la energía consumida en movimiento útil. Estos parámetros permiten evaluar el rendimiento del motor y compararlo con otros sistemas, siendo clave para el diseño y la operación de vehículos eléctricos [34].

Par motor (torque): Fuerza con la que gira el eje del motor, medida en Newton-metro (N·m).

Régimen de giro: Número de vueltas que da el eje por minuto (rpm).

Potencia del motor: Trabajo realizado por unidad de tiempo; se calcula multiplicando el par por las revoluciones y se mide en kilowatts (kW) o caballos de fuerza (HP).

Eficiencia del motor: Relación entre la energía útil obtenida y la energía consumida, expresada en porcentaje.

2.4.4 Clasificación de motores usados en motocicletas eléctricas

La elección del tipo de motor no depende únicamente de la potencia nominal, sino también de criterios como la eficiencia, la densidad del par, el costo, el nivel de mantenimiento, el comportamiento térmico y la forma en que el sistema puede ser controlado por la electrónica de potencia. Además, la arquitectura de la motocicleta (motor integrado en la rueda tipo Hub o motor central con transmisión) influyen directamente en el desempeño dinámico y en las pérdidas del tren motriz. Por ello, resulta pertinente clasificar los motores utilizados en motocicletas eléctricas, identificando sus principales características, ventajas y limitaciones, a fin de comprender su impacto en la operación y en el consumo energético del vehículo.

Clasificación por Ubicación (Arquitectura)

Esta es la distinción más visible y afecta directamente el manejo, el centro de gravedad y el mantenimiento de la motocicleta.

- ***Motor en rueda (IWM o Hub motor)***

Es aquel motor eléctrico de tracción que se integra directamente dentro del buje de la rueda, de modo que es impulsada sin necesidad de elementos de transmisión tradicionales como eje de transmisión y diferencial.

Ventajas

- Estructura compacta, alta eficiencia y respuesta rápida.
- Integración directa en el buje, eliminando eje de transmisión y diferencial.
- Costos reducidos en fabricación y mantenimiento.

Desventajas

- Sobrecalentamiento (carga térmica alta).
- Mayor demanda de par.
- Necesidad de un mejor diseño térmico [35].

- ***Motor central (Mid-Drive Motor)***

El motor se sitúa en el chasis, generalmente en la parte baja central del vehículo y transmite la potencia a la rueda trasera mediante cadena o correa.

Ventajas

- Genera un mejor equilibrio de peso que los motores en rueda.
- Presentan mejores características de ascenso en pendientes.

Desventajas

- Requiere mantenimiento para cuidar la cadena/correa y la tensión.
- Es un sistema más complejo por lo cual su costo es más elevado [36].

Clasificación por tecnología interna

Independiente de donde estén integrados, la tecnología interna define la eficiencia y la potencia.

- ***Motor BLDC (Brushless DC – Corriente Continua sin Escobillas)***

Un motor BLDC es una maquina síncrona sin escobillas en la que el rotor incorpora imanes permanentes que generan el campo magnético, mientras que los devanados se ubican en el estator para evitar contactos o conexiones deslizantes. El par se produce por la interacción entre el campo de los imanes y el campo creado por la corriente en los bobinados del estator; cuando esta excitación se maneja como corriente continua en la armadura, se denomina BLDC. En comparación con motores DC con escobillas, el BLDC suele ofrecer mayor confiabilidad y mayor densidad de potencia, lo que se traduce en tamaños más compactos [36].

- ***Motor PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor)***

Un motor PMSM es un motor de AC donde el rotor gira en sincronía con el campo magnético de estator, es decir, su velocidad esta sincronizada con la frecuencia del campo creado por las corrientes del estator. El par se genera por la interacción entre el flujo magnético del rotor (producido por imanes permanentes) y el campo de armadura del estator (producido por bobinados alimentados en AC) [36].

2.4.5 Controlador electrónico y conversión de energía

Los sistemas de conversión de energía actúan como la interfaz electrónica encargada de adecuar el flujo de potencia entre los sistemas consumidores del vehículo. En una motocicleta eléctrica, la arquitectura del tren de potencia reúne componentes que funcionan con diferentes requerimientos eléctricos, por lo que resulta imprescindible el empleo de convertidores de potencia estáticos para el acondicionamiento de los niveles de tensión y de la forma de la corriente [37].

Esta arquitectura se fundamenta típicamente en tres etapas de conversión clasificadas según su función:

1. **Rectificación (AC-DC):** Integrado en el módulo de carga a bordo, transforma la corriente alterna de la red eléctrica en corriente continua para cargar la batería de tracción.
2. **Conversión (DC-DC):** Reduce el alto voltaje del paquete de baterías a niveles de bajo voltaje (12V) para alimentar los sistemas auxiliares como iluminación, señalización e instrumentación.

3. **Inversión (DC-AC):** Es el encargado de transformar la corriente continua de la batería en señales alternas trifásicas para controlar el par y la velocidad del motor eléctrico [38].

2.5 Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)

Los sistemas de adquisición de datos permiten medir variables físicas del entorno mediante sensores y convertirlas en información digital utilizable para análisis, monitoreo y control. En ingeniería, los DAQ son fundamentales para estudios experimentales, ya que posibilitan la captura confiable de señales eléctricas y ambientales en tiempo real [39].

En el mercado existe variedad de sistemas de adquisición de datos, que van desde soluciones propietarias de alto costo, tanto en hardware como en software, hasta alternativas más flexibles. La selección del sistema de adquisición depende en gran medida de la magnitud física que se desea medir. Asimismo, es fundamental analizar si dicha magnitud varía con el tiempo y a qué velocidad lo hace. Algunos fenómenos físicos presentan variaciones lentas, como la temperatura, mientras que otros pueden cambiar varias veces por segundo. En consecuencia, las características del sistema físico a medir determinan los requisitos del sistema de adquisición necesario para obtener datos confiables [40].

El presente capítulo ha permitido establecer los fundamentos teóricos relacionados con la movilidad eléctrica, el funcionamiento de los sistemas de propulsión en motocicletas eléctricas y los principales factores que influyen en su consumo energético y autonomía. Asimismo, se han analizado las variables eléctricas, operativas y ambientales relevantes, así como la importancia de la adquisición de datos para su registro y análisis. Estos fundamentos constituyen la base conceptual sobre la cual se desarrolla la metodología experimental del estudio, presentada en el siguiente capítulo, orientada a analizar la autonomía de una motocicleta eléctrica en condiciones reales de operación.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describe la metodología empleada para evaluar la autonomía y el consumo energético de la motocicleta eléctrica Torino Racer bajo las condiciones reales de operación en el cantón Ibarra. Se presentan el enfoque y diseño de la investigación, el área de estudio, las rutas de ensayo y la descripción del vehículo de prueba. Asimismo, se detallan las variables consideradas, los materiales, equipos y software utilizados, así como el procedimiento experimental, el procesamiento de datos y el cálculo de las variables e indicadores empleados para el análisis del desempeño energético de la motocicleta.

3.1 Enfoque y tipo de investigación

3.1.1 Enfoque de la investigación

La investigación posee un enfoque cuantitativo, debido a que se fundamenta en la medición de variables físicas, así como en el tratamiento y análisis de los datos experimentales. Este enfoque permite evaluar de manera objetiva la relación entre las condiciones de operación, la topografía de la ruta y el consumo energético.

3.1.2 Tipo de investigación

Investigación de Campo

Los datos se recopilan directamente durante recorridos en diversas rutas del cantón Ibarra, lo que permite analizar el comportamiento energético de la motocicleta eléctrica bajo condiciones reales de operación.

Investigación Experimental

El estudio presenta un carácter experimental, debido a que se establecen condiciones controladas en la medida de las posibilidades experimentales, manteniendo constantes aquellas variables que podían ser controladas directamente por el investigador.

Nivel Descriptivo y Correlacional

En una primera etapa se describe el comportamiento del consumo energético y la autonomía de la motocicleta eléctrica; posteriormente, se analizan las relaciones existentes entre la topografía del terreno y las variables energéticas registradas.

3.2 Diseño de la investigación

Para comprender de forma confiable cómo la topografía afecta la autonomía de la motocicleta eléctrica, el trabajo se organizó en varias fases que abarcan desde la planificación y la creación del sistema de adquisición de datos hasta las pruebas de campo, terminando con el procesamiento y análisis de toda la información recolectada.

En la primera etapa, tras una exhaustiva revisión bibliográfica, se determinó el área de estudio y el vehículo de prueba. En base en estos elementos se establecieron las variables de estudio, las rutas experimentales y los componentes necesarios para el desarrollo del sistema de adquisición de datos. Posteriormente, se diseñó, construyó y validó el sistema de monitoreo, el cual permitió registrar las variables eléctricas, dinámicas y geográficas durante los recorridos.

Tras comprobar el correcto funcionamiento del hardware de recolección, se ejecutaron las pruebas de campo a lo largo de los trayectos establecidos en el cantón Ibarra bajo parámetros de conducción controlados asegurando lecturas constantes, para luego analizar esta información en MATLAB con el fin de calcular las variables derivadas y determinar el impacto del relieve sobre el gasto de energía y el alcance del vehículo.

La Figura 1 presenta el diagrama de bloques que resume las principales etapas del diseño de la investigación.

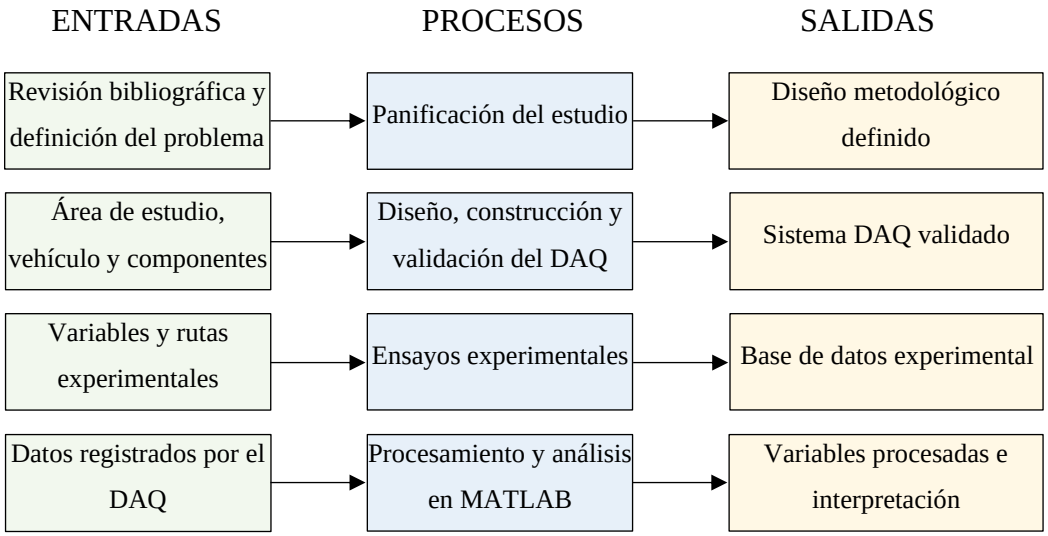


Figura 1. Diagrama de bloques del diseño de la investigación

3.3 Área de estudio

La presente investigación se desarrolló en el cantón Ibarra, ubicado en la provincia de Imbabura, al norte del Ecuador. El cantón presenta una altitud de 2225 m s.n.m., característica que, junto con la diversidad de su relieve, proporciona condiciones adecuadas para evaluar la influencia de la topografía sobre la autonomía de una motocicleta eléctrica.

La topografía del cantón Ibarra se caracteriza por la presencia de zonas relativamente planas en el sector central, así como las pendientes, valles y elevaciones distribuidas en diferentes sectores del territorio. Estas variaciones altimétricas generan condiciones de circulación diversas, lo que permite analizar el comportamiento energético de la motocicleta eléctrica bajo distintos perfiles de pendiente, aspecto fundamental para el desarrollo de la presente investigación[41].

Con base a estas características, se seleccionaron rutas ubicadas en el área urbana y periurbana del cantón Ibarra, representativas de diversas condiciones topográficas y de circulación. La selección de estos recorridos permitió evaluar el comportamiento de la motocicleta eléctrica en escenarios con distintos cambios de elevación, manteniendo condiciones de operación previamente definidas para garantizar la confiabilidad de los ensayos experimentales.

3.4 Definición de las rutas de ensayo

Para la recolección de datos se definieron recorridos en el entorno urbano y periurbano del cantón de Ibarra, integrando las parroquias urbanas de San Francisco, El Sagrario, El Priorato, Alpachaca y Caranqui, así como los sectores de transición hacia las parroquias de La Esperanza y San Antonio de Ibarra. Esta selección respondió a la necesidad de evaluar el desempeño de la motocicleta eléctrica bajo condiciones heterogéneas de topografía, circulación y demanda energética, garantizando una cobertura representativa de los escenarios de operación considerados en la investigación.

La selección de los recorridos respondió a un criterio topográfico intencional, orientado a representar tres escenarios operativos: terreno plano, terreno ondulado y terreno con pendientes pronunciadas. Esta clasificación permitió aislar la influencia de la topografía sobre

el consumo energético, la autonomía y el comportamiento del sistema de propulsión bajo condiciones reales de circulación. Asimismo, los recorridos fueron estandarizados para garantizar la repetibilidad de los ensayos y la consistencia de los datos registrados mediante el sistema de adquisición de datos (DAQ).

Se definieron seis rutas las cuales permiten representar los principales perfiles topográficos y condiciones de circulación presentes en el cantón Ibarra, incluyendo recorridos predominantemente planos, ascendentes, descendentes y mixtos.

Tabla 3. Clasificación de las rutas de ensayo

Ruta	Denominación Técnica	Objetivo de Ensayo
Ruta 1	Circuito Urbano Mixto	Validación del DAQ y repetibilidad estadística.
Ruta 2	Corredor de Ascenso Continuo	Evaluación de demanda máxima en carga sostenida.
Ruta 3	Travesía de Perfil Complejo	Análisis de regeneración y topografía variable.
Ruta 4	Transversal de Ciclo Transitorio	Evaluación de eficiencia en condiciones urbanas.
Ruta 5	Corredor de Transición Periurbana	Análisis de estabilidad de consumo en vías rápidas.
Ruta 6	Circuito de Descarga Profunda	Caracterización de la curva de descarga limite.

Ruta 1 – Circuito Urbano de Referencia

Sirvió como escenario base para validar el DAQ y asegurar la repetibilidad de los experimentos, ya que al ser un trazado cerrado con circulación controlada se eliminaron variables externas como el tráfico o las detenciones continuas.

Ruta 2 – Corredor de Ascenso Continuo

Este trayecto se eligió para someter al sistema a una carga mecánica sostenida, observando directamente la respuesta del motor y la caída de tensión del banco de baterías bajo estrés térmico. Aislando la pendiente como factor principal de consumo, se extrajeron datos sobre la eficiencia del vehículo al exigirle un par constante cuesta arriba.

Ruta 3 - Travesía de Perfil Complejo

Al mezclar subidas prolongadas, bajadas fuertes y zonas planas, el recorrido fue el entorno ideal para probar el freno regenerativo y la conversión energética. Gracias a los

continuos cambios de relieve, se pudo registrar la reacción de hardware ante ciclos intermitentes de carga y descarga, dando un panorama claro del rendimiento en terrenos irregulares.

Ruta 4 - Transversal de Ciclo Transitorio

Este trayecto con un perfil topográfico que alterna depresiones y ascensos, permitió evaluar la capacidad del sistema para gestionar transitorios de corriente ante las variaciones de velocidad exigidas por el entorno urbano. Este escenario fue fundamental para identificar cómo las detenciones frecuentes y la necesidad de aceleraciones constantes afectan la autonomía total y la eficiencia de descarga del banco de baterías.

Ruta 5 - Corredor Periférico (Anillo Vial – San Antonio)

Conecta el centro con las zonas exteriores, alternando tramos de tráfico rápido con rampas de subida hacia las parroquias. El objetivo aquí fue comprobar si el gasto energético mantiene su estabilidad al pasar a regímenes de velocidad más altos y pendientes graduales fuera del casco urbano.

Ruta 6 – Circuito de Descarga Profunda

Esta ruta fue diseñada como un ensayo de descarga profunda para determinar la autonomía máxima y caracterizar la curva de descarga final del banco de baterías. Al ejecutarse en un circuito cerrado de perfil ondulado, permitió monitorear continuamente el comportamiento de voltaje y del estado de carga (SoC) hasta alcanzar el umbral mínimo de operación. Este ensayo permitió establecer el límite práctico de autonomía y analizar el comportamiento energético del vehículo bajo condiciones de uso intensivo.

La distribución espacial de las rutas seleccionadas, representada en la Figura 2, evidencia una interconexión entre el casco urbano y las parroquias periféricas del cantón Ibarra, Esta configuración permitió evaluar la motocicleta eléctrica en escenarios con diferentes perfiles topográficos y condiciones de circulación, proporcionando una cobertura representativa de la infraestructura vial considerada en el estudio. De esta manera, el diseño experimental favoreció la obtención de información confiable sobre el comportamiento energético del vehículo bajo distintas condiciones de operación.

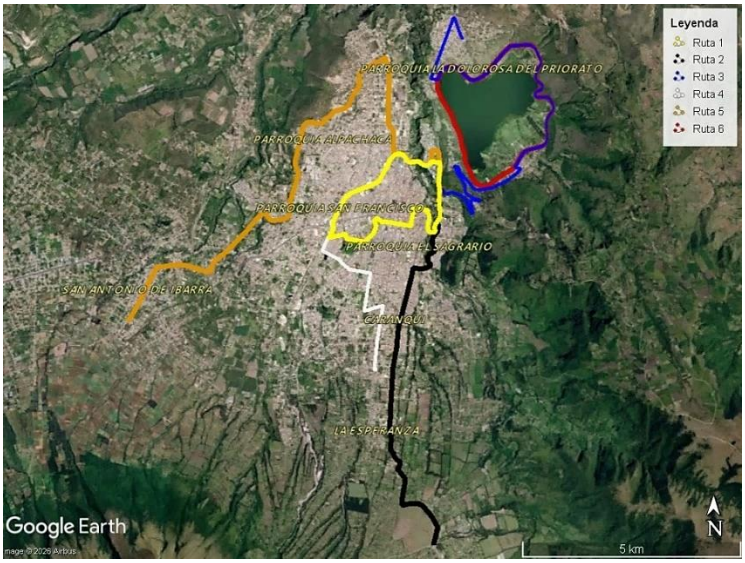


Figura 2. Distribución espacial de las rutas experimentales evaluadas en el cantón Ibarra.

3.5 Descripción del vehículo de prueba

Para la ejecución de las pruebas experimentales y el levantamiento de datos, se seleccionó como unidad de estudio una motocicleta eléctrica modelo Torino Racer, de la marca Urvane (ver Figura 3). Este vehículo se categoriza dentro del segmento de movilidad urbana, optimizado para trayectos de media distancia.

Figura 3. Motocicleta eléctrica Torino Racer.

Las especificaciones técnicas de la unidad experimental se obtuvieron a partir de la documentación técnica del fabricante (Anexo A) y fueron verificadas mediante la inspección

directa de los componentes instalados en la motocicleta. Los principales parámetros técnicos del vehículo se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones técnicas de la motocicleta Urvane Torino Racer

Parámetro	Especificación
Marca	Urvane
Modelo	Torino Racer
Año de fabricación	2024
Potencia nominal del motor	1200 W
Sistema de almacenamiento	72 V/25 Ah (set de 6 baterías)
Autonomía teórica	70 km (aprox.)
Velocidad máxima	75 km/h (aprox.)
Capacidad de carga máxima	180 kg
Sistema de frenado	Disco frontal y posterior
Dimensiones (Largo/Ancho/Alto)	183 cm / 66 cm / 102 cm

De acuerdo con la Tabla 4, la motocicleta dispone de un motor de 1200 W y un sistema de almacenamiento de 72 V y 25 ah, características que la convierten en una plataforma adecuada para evaluar la influencia de la topografía sobre la autonomía en condiciones reales de circulación.

3.5.1 Sistema de propulsión

El sistema de propulsión de la motocicleta eléctrica está compuesto por el motor eléctrico y el controlador electrónico, los cuales se encargan de regular la conversión y el suministro de energía desde el banco de baterías hacia la rueda de tracción. A continuación, se describen las características de estos componentes.

Motor eléctrico

La motocicleta cuenta con un motor eléctrico de corriente continua sin escobillas (BLDC, por sus siglas en inglés) de accionamiento directo tipo hub, montado sobre la rueda trasera del vehículo. Este diseño elimina los sistemas de transmisión mecánica intermedios (como cadenas o correas), minimizando las pérdidas por fricción y mejora la eficiencia del tren

motriz. El reconocimiento del motor instalado se realizó mediante inspección directa del vehículo, encontrando la inscripción "QS1200W" sobre la carcasa del motor (Figura 4).

Figura 4. Motor eléctrico BLDC tipo hub de 1200 W

Debido a que no se encontró disponible la ficha técnica específica del motor instalado, se tomó como referencia la ficha técnica oficial publicada por QS Motor para un motor de 1200 W de características similares [42]. Para efectos del modelado matemático y análisis de eficiencia energética de la motocicleta, se consideraron los parámetros técnicos de referencia detallados en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros técnicos de referencia del motor eléctrico tipo hub

Parámetro	Especificación
Potencia nominal / máxima	1200 W / 2000 W
Voltaje nominal	72 V
Torque máximo	100 N·m
Corriente nominal / máxima	23 A / 40 A
Eficiencia máxima	89% a 93%
Temperatura operativa máxima	70 °C (Pico: 120 °C)
Grado de operación	IP67

Controlador

La motocicleta utiliza un controlador electrónico el cual se encarga de regular el suministro de energía desde el banco de baterías hacia el motor eléctrico. La identificación del

controlador se realizó mediante inspección directa, verificándose que corresponde a un equipo fabricado por Wuxi Lingbo Electronic Technologies Co., Ltd., modelo LBMCH222C-M56, con un voltaje nominal de 72 V, información visible en la etiqueta del dispositivo.

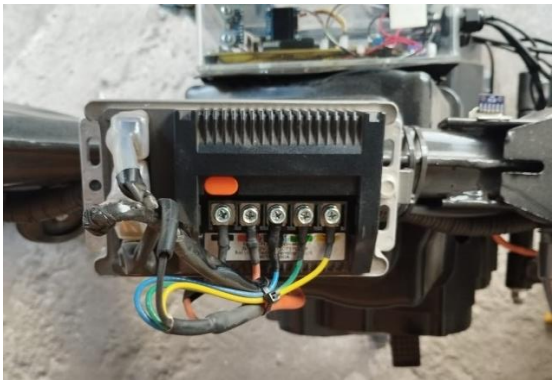


Figura 5. Controlador electrónico de la marca Wuxi Lingbo

La Figura 5 muestra el controlador electrónico instalado en la motocicleta, encargado de gestionar el suministro de energía hacia el motor eléctrico. A partir de la identificación del modelo y de la información proporcionada por el fabricante, se recopilaron los principales parámetros técnicos y operativos del dispositivo, los cuales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros técnicos operativos del controlador Wuxi Lingbo (serie LBMC)

Parámetro	Especificación
Fabricante	Wuxi Lingbo Electronic Technology Co., Ltd.
Voltaje nominal de entrada	72 V
Corriente máxima registrada	40 A
Freno regenerativo	Disponible

3.5.2 Sistema de almacenamiento de energía

El sistema de almacenamiento de energía es la principal fuente de alimentación de la motocicleta eléctrica, se encarga de suministrar la energía pata el funcionamiento del sistema de propulsión y de los demás componentes eléctricos del vehículo. En este apartado se describen las características del banco de baterías y del sistema de recarga.

Banco de Baterías

La motocicleta cuenta con un banco de baterías configurado a 72 V, compuesto por seis unidades individuales conectadas en serie, modelo TNE 12-25 de la marca Tianneng. Estas baterías son de tecnología AGM-Gel (plomo-gel), diseñadas específicamente para aplicaciones de descarga profunda (deep cycle) en vehículos eléctricos. En la Figura 6 se presenta la configuración del banco de baterías y los detalles técnicos de la baterá empleada.

(a) (b)

Figura 6. Banco de baterías: (a) configuración del paquete de almacenamiento en el chasis, (b) detalle de la unidad individual TNE 12-25.

Para efectos del análisis de autonomía y gestión energética en las parroquias urbanas de Ibarra, se han extraído los parámetros operativos fundamentales que caracterizan a este banco de baterías, los cuales se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7. Especificaciones técnicas de la batería Tianneng TNE 12-25

Parámetro	Especificación
Tecnología	Plomo-gel (VRLA AGM-Gel)
Voltaje nominal (unidad)	12V
Capacidad nominal (C_{20})	25 Ah
Voltaje de carga en ciclo	14.6 V - 14.8 V
Voltaje de flotación	13.6 V – 14.6 V
Corriente inicial de carga	2.8 A – 3.0 A

Parámetro	Especificación
Peso (unidad)	6.05 kg
Vida útil (100 % DOD)	400 – 600 ciclos

Fuente: Ficha técnica del fabricante (Tianneng Battery Group)

Como se observa en la Tabla 7, el banco de baterías está conformado por acumuladores de tecnología AGM-Gel cin una capacidad nominal de 25 Ah y un voltaje de 12 V

Sistema de carga

La motocicleta eléctrica cuenta con cargador inteligente de alimentación conmutada (Switching Power Supply), diseñado para la recarga del banco de baterías de 72 V. El equipo convierte la tensión de la red eléctrica de corriente alterna (AC) en una tensión de corriente continua (DC) adecuada para el proceso de carga, entregando una corriente nominal de 4 A. En la Figura 7 se muestra el cargador utilizado durante la investigación, así como la etiqueta donde se observan sus principales especificaciones técnicas.

(a) (b)

Figura 7. Cargador inteligente usado para recarga del banco de baterías: (a) vista general del equipo, (b) etiqueta de especificaciones técnicas.

A partir de la información impresa en el equipo, se identificaron las principales características técnicas del cargador, las cuales se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Especificaciones técnicas del cargador inteligente del banco de baterías.

Parámetro	Especificación
Denominación	Intelligent Charger
Modelo	FY8874100
Tipo	Fuente de alimentación conmutada
Voltaje de entrada	110 V AC
Frecuencia	50/60 Hz
Potencia de entrada	450 W
Voltaje de salida	79 – 89.2 V DC
Corriente de salida	4.0 A ± 0.3 A

Fuente: Elaboracion propia a partir de la informacion impresa en el equipo

Como se puede ver en la Tabla 8, el cargador opera con una alimentación de 110 V AC y suministra una tensión de salida entre 79 y 89.2 V DC, con una corriente nominal de 4 A, características compatibles con los requeriemientos de carga del banco de baterías de la motocicleta.

3.5.3 Sistema eléctrico auxiliar

La motocicleta eléctrica incorpora un sistema eléctrico auxiliar encargado de suministrar energía a los dispositivos de baja tensión y proteger el circuito eléctrico principal. Este sistema está conformado por un convertidor DC/DC y un interruptor termomagnético de corriente continua, los cuales permiten el funcionamiento de los sistemas auxiliares y contribuyen a la seguridad eléctrica del vehículo durante su operación.

Convertidor DC/DC

El convertidor DC/DC instalado en al motocicleta eléctrica se encarga de reducir el voltaje del banco de baterías de la motocicleta desde los 72 VDC, hasta una tensión de salida de 12 VDC. Esta conversión permite alimentar los dispositivos auxiliares del vehículo, tales como el sistema de iluminación, las luces direccionales, la bocina y otros equipos eléctricos de baja tensión, sin afectar el funcionamiento del sistema de propulsión. En la Figura 8 presenta el convertidor instalado en la motocicleta.

Figura 8. Convertidor DC/DC instalado en la motocicleta eléctrica.

A partir de la información impresa en la etiqueta del equipo, se identificaron las principales carácterísticas técnicas del convertidor, las cuales presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Especificaciones técnicas del convertidor DC/DC

Parámetro	Especificación
Tipo	Convertidor DC/DC
Voltaje de entrada	48-72 VDC
Voltaje de salida	12 VDC
Fecha de fabricación	2023/08

Fuente: Elaboración propia a partir de la información impresa en el equipo.

De acuerdo a la Tabla 9, el convertidor admite una tensión de entrada entre 48 y 72 V DC y proporciona una salida regulada de 12 V DC, permitiento alimentar los sistemas auxiliares de la motocicleta.

Interruptor termomagnético

La motocicleta incorpora un interruptor termomagnético de corriente continua el cual está instalado en al línea principal del banco de baterías. Su función es proteger el sistema eléctrico frente a condiciones de sobrecorrientes y cortocircuito, además de permitir la desconexión manual de la alimentación duraante el mantenimiento o inspección del vehículo. La Figura 9 muestra el dispositivo instalado.

Figura 9. Interruptor termomagnético de corriente continua instalado en la motocicleta eléctrica..

Mediante la observación del componente se tomaron en cuenta las principales características para crear una ficha de referencia, la cual se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones técnicas del interruptor termomagnético.

Parámetro	Especificación
Tipo	Convertidor DC/DC
Marca	CHNAHY
Corriente nominal	63 A
Voltaje de operación	48-96 VDC
Norma	IEC 60947
Máxima corriente de cortocircuito	3000 A

3.5.4 Panel de Instrumentos

La motocicleta eléctrica incorpora un panel de instrumentos digital en el manillar, se sencarga de proporcionar información en tiempo real sobre el estado operativo del vehículo durante la conducción. Los principales parámetros visualizados se encuentran la velocidad instantánea, el nivel de carga del banco de baterías, el modo de conducción seleccionado y la distancia recorrida mediante el odómetro parcial (Trip). Adicionalmente, el panel dispone de un indicador READY, el cual señala que el sistema de propulsión se encuentra habilitado para iniciar la marcha (ver Figura 10).

Figura 10. Panel de instrumentos digital de la motocicleta eléctrica.

3.6 Operacionalización de variables

Las variables fueron seleccionadas de acuerdo con su aporte al análisis de la autonomía de una motocicleta eléctrica. Para facilitar su interpretación y análisis, se clasifican en cuatro grupos: variables eléctricas y energéticas, variables de operación del vehículo, variables topográficas y variables ambientales. Cada una se describe indicando su definición operacional, tipo de obtención, técnica e instrumento de adquisición, unidad de medida, frecuencia de muestreo y una observación relacionada con su aplicación dentro del estudio.

3.6.1 Variables eléctricas y energéticas

Las variables eléctricas y energéticas permiten evaluar el comportamiento del sistema de almacenamiento y suministro de energía de la motocicleta eléctrica durante los recorridos experimentales. Estas variables son fundamentales para cuantificar el consumo energético, analizar el estado de la batería y determinar indicadores relacionados con la autonomía del vehículo bajo diferentes condiciones de operación y topografía. A continuación se presentan fichas con la información más relevante de cada variable.

Voltaje de batería (V)

Definición operacional	Diferencia de potencial eléctrico del banco de baterías registrada durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable medida
Técnica e instrumento	Medición mediante un divisor de voltaje conectado al sistema de adquisición de datos basado en el microcontrolador ESP32. El valor registrado corresponde al

	promedio de las muestras adquiridas por el convertidor analógico-digital ADS1115 durante cada segundo.
Unidad de medida	Voltios (V)
Frecuencia de muestreo	1 Hz (una muestra por segundo)
Observación	Se registra continuamente durante todo el recorrido y constituye una variable fundamental para el cálculo de la potencia eléctrica y de los indicadores energéticos analizados.

Corriente de batería (A)

Definición operacional	Intensidad de corriente eléctrica intercambiada entre el banco de baterías y el sistema de tracción durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable medida
Técnica e instrumento	Medición mediante un sensor de corriente ACS758 conectado al sistema de adquisición de datos basado en el microcontrolador ESP32. El valor registrado corresponde al promedio de las muestras adquiridas por el convertidor analógico-digital ADS1115 durante cada segundo.
Unidad de medida	Amperios (A)
Frecuencia de muestreo	1 Hz (una muestra por segundo)
Observación	Se registra continuamente durante todo el recorrido y constituye la variable principal para el cálculo de los indicadores analizados.

Estado de carga de la batería (SoC)

Definición operacional	Porcentaje de carga disponible del banco de baterías durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable calculada
Técnica e instrumento	Cálculo mediante el método de conteo de coulombs implementado en el microcontrolador ESP32, utilizando la corriente de la batería durante el recorrido
Unidad de medida	Porcentaje (%)

Frecuencia de muestreo	1 Hz (una muestra por segundo)
Observación	Se calcula continuamente durante el recorrido mediante el método de conteo de coulombs y permite evaluar la variación del estado de carga de la batería durante cada ensayo.

Capacidad extraída (Ah)

Definición operacional	Cantidad de carga eléctrica extraída del banco de baterías durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable calculada
Técnica e instrumento	Cálculo mediante el procesamiento de los datos de corriente de batería en MATLAB, aplicando la regla del trapecio para integrar la corriente de descarga a lo largo del tiempo.
Unidad de medida	Amperio-hora (Ah)
Frecuencia de cálculo	Al finalizar cada recorrido experimental.
Observación	Permite cuantificar la carga eléctrica consumida por la motocicleta durante cada ensayo y constituye una variable de apoyo para el análisis del consumo energético y la autonomía.

Potencia eléctrica (W)

Definición operacional	Potencia eléctrica instantánea demandada por la motocicleta durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable calculada
Técnica e instrumento	Cálculo mediante el procesamiento en MATLAB de los datos de voltaje y corriente de la batería, obteniendo el producto instantáneo entre ambas variables.
Unidad de medida	Vatios (W)
Frecuencia de cálculo	1 Hz

Observación	Se obtiene mediante el producto entre el voltaje y la corriente de la batería en cada instante de tiempo y permite analizar la demanda energética instantánea de la motocicleta durante el recorrido.

Energía consumida (Wh)

Definición operacional	Cantidad de energía eléctrica consumida por la motocicleta durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable calculada.
Técnica e instrumento	Cálculo mediante el procesamiento en MATLAB de la potencia eléctrica instantánea, aplicando la regla del trapecio para obtener la energía consumida durante el recorrido experimental.
Unidad de medida	Vatio-hora (Wh).
Frecuencia de cálculo	1 Hz.
Observación	Permite cuantificar la energía demandada por la motocicleta durante cada recorrido y constituye una de las variables principales para el análisis de la autonomía bajo diferentes condiciones de operación y topografía.

Energía regenerada (Wh)

Definición operacional	Cantidad de energía eléctrica recuperada por el sistema de frenado regenerativo durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable calculada.
Técnica e instrumento	Cálculo mediante el procesamiento de los datos de potencia eléctrica en MATLAB, aplicando la regla del trapecio para la integración numérica sobre los intervalos donde existe regeneración de energía.
Unidad de medida	Vatio-hora (Wh).
Frecuencia de cálculo	1 Hz.
Observación	Cuantifica la energía recuperada durante las fases de frenado regenerativo y permite evaluar la contribución de este sistema a la reducción del consumo energético de la motocicleta.

Energía neta (Wh)

Definición operacional	Cantidad de energía eléctrica extraída del banco de baterías durante el recorrido experimental, considerando la energía consumida y la energía recuperada mediante el frenado regenerativo.
Tipo de obtención	Variable calculada.
Técnica e instrumento	Cálculo mediante el procesamiento de los datos en MATLAB, obteniendo la diferencia entre la energía consumida y la energía regenerada.
Unidad de medida	Vatio-hora (Wh).
Frecuencia de cálculo	1 Hz.
Observación	Representa la energía efectivamente utilizada por la motocicleta durante el recorrido y constituye una variable fundamental para evaluar el consumo energético real y la autonomía del vehículo.

Rendimiento energético (Wh/km)

Definición operacional	Cantidad de energía eléctrica neta consumida por la motocicleta para recorrer un kilómetro durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable calculada.
Técnica e instrumento	Cálculo mediante el procesamiento en MATLAB, relacionando la diferencia entre la energía consumida y la regenerada con la distancia recorrida.
Unidad de medida	Vatio-hora por kilómetro (Wh/km).
Frecuencia de cálculo	Al finalizar cada recorrido experimental.
Observación	Permite evaluar la eficiencia energética de la motocicleta y comparar el desempeño entre rutas con diferentes características topográficas y condiciones de operación.

3.6.2 Variables de operación del vehículo

Las variables de operación del vehículo describen el comportamiento dinámico de la motocicleta durante los recorridos experimentales. Estas variables permiten caracterizar las

condiciones de conducción y analizar su influencia sobre el consumo energético y la autonomía bajo diferentes perfiles topográficos.

Velocidad del vehículo (km/h)

Definición operacional	Velocidad instantánea de desplazamiento de la motocicleta durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable medida.
Técnica e instrumento	Medición mediante el módulo GNSS u-blox NEO-M8N conectado al sistema de adquisición de datos basado en el microcontrolador ESP32. El valor registrado corresponde al promedio de las mediciones de velocidad obtenidas durante cada segundo.
Unidad de medida	Kilómetros por hora (km/h).
Frecuencia de muestreo	1 Hz (una muestra por segundo).
Observación	Se registra continuamente durante el recorrido y permite caracterizar el comportamiento de conducción, así mismo como analizar su influencia sobre el consumo energético y la autonomía de la motocicleta.

Distancia recorrida (km)

Definición operacional	Longitud total del trayecto recorrido por la motocicleta durante cada ensayo experimental.
Tipo de obtención	Variable calculada.
Técnica e instrumento	Cálculo en tiempo real mediante la distancia geodésica entre coordenadas geográficas consecutivas registradas por el módulo GNSS u-blox NEO-M8N e implementada en el microcontrolador ESP32.
Unidad de medida	kilómetros (km).
Frecuencia de cálculo	1 Hz
Observación	Se actualiza continuamente durante el recorrido y constituye una variable fundamental para el análisis de la autonomía y el cálculo del rendimiento energético de la motocicleta.

Tiempo de recorrido (s)

Definición operacional	Duración del recorrido experimental de la motocicleta desde el inicio hasta la finalización de cada ensayo.
Tipo de obtención	Variable calculada.
Técnica e instrumento	Cálculo mediante el procesamiento de las marcas temporales registradas por el módulo GNSS u-blox NEO-M8N y almacenadas por el sistema de adquisición de datos, determinando la diferencia entre el tiempo inicial y el tiempo final del recorrido en MATLAB.
Unidad de medida	Segundos (s).
Frecuencia de cálculo	Al finalizar cada recorrido experimental.
Observación	Permite determinar la duración de cada ensayo y analizar su relación con el consumo energético y el comportamiento de la motocicleta bajo diferentes condiciones de operación y topografía.

Aceleración del vehículo ($\mathbf{m/s^2}$)

Definición operacional	Variación de la velocidad de la motocicleta durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable calculada.
Técnica e instrumento	Cálculo mediante el procesamiento en MATLAB de los datos registrados por la unidad de medición inercial (IMU) MPU9250, aplicando un filtro de promedio móvil y la conversión de la aceleración de *g* a metros por segundo al cuadrado (m/s^2).
Unidad de medida	Metros por segundo al cuadrado (m/s^2).
Frecuencia de cálculo	1 Hz
Observación	Permite identificar eventos de aceleración y desaceleración durante el recorrido y analizar su influencia sobre la demanda de corriente y el consumo energético de la motocicleta.

3.6.3 Variables topográficas

Las variables topográficas permiten caracterizar el perfil altimétrico de las rutas experimentales, proporcionando información sobre las variaciones del terreno que influyen en el consumo energético y la autonomía de la motocicleta eléctrica. Estas variables constituyen un elemento fundamental para analizar la relación entre topografía y el desempeño del vehículo.

Altitud (m s.n.m.)

Definición operacional	Elevación de la motocicleta con respecto al nivel medio del mar durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable medida.
Técnica e instrumento	Medición mediante el módulo GNSS u-blox NEO-M8N, el sensor barométrico BMP280 o la fusión de ambas mediciones, según la calidad y el comportamiento de los datos registrados en cada ruta. El procesamiento y selección de la información se realiza en MATLAB.
Unidad de medida	Metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.).
Frecuencia de cálculo	1 Hz (una muestra por segundo).
Observación	Constituye una variable fundamental para la construcción del perfil altimétrico de las rutas y para el cálculo de la pendiente, el desnivel acumulado y el análisis de la influencia de la topografía sobre la autonomía de la motocicleta.

Pendiente de la vía (%)

Definición operacional	Inclinación longitudinal del terreno expresada como el porcentaje de variación de la altitud respecto a la distancia recorrida durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable calculada.
Técnica e instrumento	Cálculo mediante el procesamiento en MATLAB de los datos de altitud y distancia recorrida, determinando la relación entre la variación de elevación y la distancia recorrida. Posteriormente, la señal es suavizada mediante un promedio móvil para reducir el efecto del ruido presente en las mediciones.
Unidad de medida	Porcentaje (%)

Frecuencia de cálculo	1 Hz
Observación	Permite caracterizar el perfil topográfico de las rutas y analizar la influencia de las pendientes sobre el consumo energético y la autonomía de la motocicleta.

3.6.4 Variables ambientales

Las variables ambientales permiten caracterizar las condiciones del entorno durante los recorridos experimentales. Estas variables se consideran como factores complementarios para la interpretación del comportamiento energético de la motocicleta en cada ensayo.

Temperatura de la batería (°C)

Definición operacional	Temperatura registrada en el banco de baterías durante el recorrido experimental.
Tipo de obtención	Variable medida
Técnica e instrumento	Medición mediante un sensor digital DS18B20 conectado al sistema de adquisición de datos basado en el controlador ESP32.
Unidad de medida	Grados Celsius (°C)
Frecuencia de registro	1 Hz.
Observación	Se registra durante el recorrido para caracterizar la condición térmica del banco de baterías y apoyar la interpretación del comportamiento energético observado en cada ensayo.

Temperatura ambiente (°C)

Definición operacional	Temperatura del aire registrada durante el recorrido experimental
Tipo de obtención	Variable medida.
Técnica e instrumento	Medición mediante el sensor digital DHT22 conectado al sistema de adquisición de datos basado en el microcontrolador ESP32.
Unidad de medida	Grados Celsius (°C).
Frecuencia de registro	1 Hz

Observación	Se registra durante cada recorrido como una variable ambiental de referencia para la interpretación de los resultados energéticos obtenidos bajo diferentes condiciones de ensayo.

Humedad relativa (%)

Definición operacional	Porcentaje de vapor de agua presente en el aire durante el recorrido experimental, con relación a la cantidad máxima que el aire puede contener a la misma temperatura.
Tipo de obtención	Variable medida.
Técnica e instrumento	Medición mediante el sensor digital DHT22 conectado al sistema de adquisición de datos basado en el microcontrolador ESP32.
Unidad de medida	Porcentaje (%)
Frecuencia de registro	1 Hz.
Observación	Se registra durante cada recorrido como una variable ambiental de referencia para complementar la caracterización de las condiciones de ensayo.

3.7 Materiales, equipos y software

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon diversos materiales, equipos y herramientas de software destinados a la implementación del sistema de adquisición de datos (DAQ), la validación de sensores, la ejecución de los recorridos experimentales y el procesamiento de la información obtenida. Los principales recursos empleados se describen en los apartados siguientes.

3.7.1 Materiales y equipos

Para el desarrollo del sistema de adquisición de datos y la ejecución de las pruebas experimentales se emplearon diversos materiales, equipos electrónicos e instrumentos de medición. En la Tabla XI se presentan los principales elementos utilizados durante la investigación.

Tabla 11: Materiales y equipos empleados durante la investigación

Material o equipo	Modelo/Especificación	Función
Motocicleta eléctrica	Torino racer	Vehículo utilizado para los ensayos experimentales
ESP32	ESP-WROOM-32U	Control y adquisición de datos
Sensor de corriente	ACS758-050B	Medición de corriente de la batería
Módulo GNSS	u-blox NEO-M8N	Posición, velocidad y altitud
Sensor inercial (IMU)	MPU-9250	Medición de aceleración
Sensor ambiental	DHT22	Temperatura y humedad relativa
Sensor de temperatura	DS18B20	Temperatura del banco de baterías
Sensor barométrico	BMP280	Presión atmosférica y altitud referencial
ADS1115	ADC de 16 bits	Conversión analógica - digital
Pantalla OLED	128 x 64 pixels	Visualización de variables
Módulo MicroSD	SPI	Escritura de datos
Tarjeta MicroSD	MicroSD 8Gb	Almacenamiento de datos
Convertidor DC – DC Buck	XL4015	Regulación de voltaje
Power Bank 5V	20000 mAh	Alimentación auxiliar del DAQ
Multímetro Digital	XL830L	Verificación de voltajes y continuidad
Pinza amperimétrica	ANENG ST212	Verificación de corriente
Pinza amperimétrica	CL101C	Verificación de corriente
GPS portátil	Garmin GPSMAP 64s	Validación de posición y altitud
Casco de protección	Certificado	Protección durante los recorridos en motocicleta

A continuación, se presenta una breve descripción de los materiales indicados en la Tabla XI, con excepción de la motocicleta eléctrica, cuya descripción y características técnicas fueron desarrolladas previamente en el apartado correspondiente al vehículo de prueba. Para cada

material o equipo se incluye una ficha técnica resumida con sus principales parámetros y especificaciones, considerando los aspectos relevantes para su aplicación en el sistema de adquisición de datos y en el desarrollo de los ensayos experimentales.

ESP32-WROOM-32U

El ESP-32U es un módulo de microcontrolador de propósito general que integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth (BT/BLE), además de una alta capacidad de procesamiento para aplicaciones para aplicaciones embebidas [43]. En esta investigación se empleó como unidad central del sistema de adquisición de datos (DAQ), encargada de la lectura de los sensores, el procesamiento de la información y el almacenamiento de los datos obtenidos durante los recorridos experimentales.

Tabla 12. Ficha técnica ESP32-WROOM-32U

Parámetro	Especificación
Modelo	ESP32-WROOM-32U
Microcontrolador	ESP32-DOWD
Arquitectura	Xtensa LX6 de 32 bits, doble núcleo
Frecuencia de operación	80-240 Hz
Memoria Flash	4 MB SPI flash
Voltaje de alimentación	3.0-3.6 V
Conectividad	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE
Interfaces	GPIO, UART, SPI, I^2C, I^2S, ADC, DAC, PWM
Temperatura de operación	-40 °C a 85 °C

Fuente: Elaborado a partir de Espressif Systems [43].

ACS758-050B

El ACS758-050B es un sensor de corriente basado en el efecto Hall, diseñado para medir corrientes continuas y alternas de forma bidireccional. El dispositivo proporciona una salida analógica proporcional a la corriente medida y ofrece aislamiento galvánico entre el circuito de potencia y el circuito de medición [44]. En esta investigación se utilizó para registrar la corriente

suministrada por el banco de batería de la motocicleta eléctrica durante los recorridos experimentales.

Tabla 13. Ficha técnica ACS758-050B

Parámetro	Especificación
Modelo	ACS758LCB-050B
Principio de funcionamiento	Efecto Hall
Rango de medición	±50 A
Sensibilidad	40 mV/A
Voltaje de alimentación	3.0-5.5 V
Ancho de banda	120 kHz
Tiempo de respuesta	4 µs
Tipo de salida	Analógica, proporcional a la corriente
Aislamiento	Galvánico

Fuente: Elaborado a partir de Allegro MicroSystems [44].

GPS u-blox NEO-M8N

El u-blox NEO-M8N es un módulo receptor GNSS de alto rendimiento capaz de recibir simultáneamente señales de los sistemas GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou, proporcionando información de posición, velocidad y tiempo con alta precisión [45]. En esta investigación se empleó para registrar las coordenadas geográficas, la velocidad y la altitud de la motocicleta durante los recorridos experimentales, permitiendo el análisis de la autonomía en función de la topografía del cantón Ibarra.

Tabla 14. Ficha técnica GPS u-blox NEO-M8N

Parámetro	Especificación
Modelo	u-blox NEO-M8N
Tipo	Módulo receptor GNSS
Canales	72
Sistemas compatibles	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS y SBAS
Precisión horizontal	2.5 m (CEP)
Frecuencia de actualización	Hasta 10 Hz
Interfaz de comunicación	UART, I^2C (DDC), SPI y USB
Voltaje de alimentación	2.7- 3.6 V
Velocidad UART por defecto	9600 bps
Temperatura de operación	-40 °C a +85 °C

Fuente: Elaborado a partir de u-blox [45].

Antena magnética GNSS

La antena activa utilizada es compatible con los sistemas de navegación GPS y BeiDou, operando en las bandas L1 (1575 MHz) y B1 (1561 MHz). Incorpora un amplificador de bajo ruido (LNA) con una ganancia típica de 38 dB y funciona con una alimentación de 3.0 a 5.0 V.

Tabla 15. Ficha técnica Antena magnética GNSS

Parámetro	Especificación
Tipo	Antena GNSS (GPS + BeiDou)
Voltaje de alimentación	3.0-5.0 V DC
Frecuencia de operación	1575 MHz (GPS L1) / 1561 MHz (BeiDou B1)
Frecuencia central	1568 MHz
Ganancia del LNA	38 dB (típica)

MPU-9250

El MPU-9250 es una unidad de medición inercial (IMU) de nueve grados de libertad (9-DOF) que integra un acelerómetro triaxial, un giroscopio triaxial y un magnetómetro triaxial,

además de un procesador digital de movimiento (DMP)[46]. En esta investigación se utilizó principalmente para registrar la aceleración de la motocicleta durante los recorridos experimentales, permitiendo analizar las variaciones dinámicas del vehículo y su influencia sobre el consumo energético y la autonomía.

Tabla 16. Ficha técnica MPU-9250

Parámetro	Especificación
Modelo	MPU-9250
Tipo	Unidad de Medición Inercial (IMU) de 9 ejes
Sensores integrados	Acelerómetro, giroscopio y magnetómetro de 3 ejes
Resolución ADC	16 bits
Rango de acelerómetro	±2 g, ±4 g, ±8 g, ±16 g
Rango del giroscopio	±250, ±500, ±1000 y ±2000 °/s
Rango del magnetómetro	±4800 µT
Voltaje de alimentación (VDD)	2.4- 3.6 V
Interfaces de comunicación	I^2C, SPI
Temperatura de operación	-40 °C a +85 °C

Fuente: Elaborado a partir de InvenSense [46].

DHT22 (AM2303)

El DHT22 (AM2303) es un sensor digital que integra la medición de temperatura y humedad relativa en un solo dispositivo. Incorpora un sensor capacitivo para la humedad y un sensor de temperatura calibrado de fábrica, proporcionando una salida digital de alta sensibilidad y bajo consumo energético [47]. En esta investigación se utilizó para registrar las condiciones ambientales durante los recorridos experimentales.

Tabla 17. Ficha técnica DHT22

Parámetro	Especificación
Modelo	AM2303 (DHT22)
Variables medidas	Temperatura y humedad relativa
Voltaje de alimentación	3.3-6 V
Rango de humedad	0-100 %RH
Rango de temperatura	-40 °C a + 125 °C
Precisión de humedad	±2 %RH (máx. ±5 %RH)
Precisión de temperatura	±0.2 °C
Resolución	0.1 %RH / 0.1 °C
Tipo de salida	Digital
Período de muestreo	2 s

Fuente: Elaborado a partir de Aosong (Guangzhou) Electronics Co., Ltd. [47].

DS18B20

El DS18B20 es un termómetro digital que utiliza el protocolo de comunicación 1-Wire, se encarga de medir la temperatura con resolución programable entre 9 y 12 bits, lo que facilita la conexión de varios dispositivos en un mismo bus de comunicación [48]. En esta investigación se utilizó para monitorear la temperatura del banco de baterías durante los recorridos experimentales.

Tabla 18. Ficha técnica DS18B20

Parámetro	Especificación
Modelo	DS18B20
Variable medida	Temperatura
Rango de medición	-55 °C a +125 °C
Precisión	±0.5 °C (-10 °C a 85 °C)
Resolución	Programable de 9 a 12 bits
Voltaje de alimentación	3.0-5.5 V
Interfaz de comunicación	1-Wire

Parámetro	Especificación
Tiempo máximo de conversión	750 ms (12 bits)
Encapsulado	TO-92 (3 pines)

Fuente: Elaborado a partir de Maxim Integrated [48].

BMP280

El BMP280 es un sensor digital de presión barométrica de alta precisión que integra un sensor de presión y un sensor interno de temperatura. Emplea interfaces de comunicación I^2C y SPI, permitiendo estimar la presión atmosférica y calcular la altitud con alta resolución [49]. En esta investigación se utilizó para registrar la presión atmosférica y apoyar la estimación de la altitud durante los recorridos experimentales de la motocicleta eléctrica.

Tabla 19. Ficha técnica BMP280

Parámetro	Especificación
Modelo	BMP280
Variables medidas	Presión atmosférica y temperatura
Rango de presión	300-1100 hPa
Rango de temperatura	-40 °C a +85 °C
Precisión de presión	±1 hPa (típica)
Precisión de temperatura	±1 °C (0 a 65 °C)
Resolución de temperatura	0.01 °C
Voltaje de alimentación	1.71-3.6 V
Interfaz de comunicación	I^2C y SPI
Consumo típico	2.7 µA (a 1 Hz)

Fuente: Elaborado a partir de Bosch Sensortec [49].

ADS1115

El ADS1115 es un convertidor analógico-digital (ADC) de 16 bits con comunicación I^2C, diseñado para aplicaciones de adquisición de señales de alta precisión y bajo consumo energético. Incorpora un amplificador de ganancia programable (PGA), cuatro entradas

analógicas de propósito general y una velocidad de conversión de hasta 860 muestras por segundo, permitiendo la medición precisa de variables analógicas provenientes de sensores [50].

Tabla 20. Ficha técnica ADS1115

Parámetro	Especificación
Modelo	ADS1115
Fabricante	Texas Instruments
Resolución	16 bits
Entradas analógicas	4 de un solo extremo o 2 diferenciales
Velocidad máxima de conversión	860 SPS
Voltaje de alimentación	2.0-5.5 V
Interfaz de comunicación	I^2C
Ganancia programable (PGA)	±0.256 V a ±6.144 V
Consumo típico	150 µA
Rango de temperatura de operación	-40 °C a +125 °C

Fuente: Elaborado a partir de Texas Instruments [50].

SSD1306 (OLED 128 X 64 pixels)

El SSD1306 es un conductor CMOS para pantallas gráficas OLED de 128 x 64 píxeles, que integra memoria gráfica (GDDRAM), control de contraste, oscilador interno y controlador de pantalla en un solo circuito integrado. Soporta comunicación mediante I^2C, SPI y buses paralelos 6800/8080, lo que facilita su integración con microcontroladores. En esta investigación, se utilizó para visualizar en tiempo real las variables medidas por el sistema de adquisición de datos implementado con el ESP32.

Tabla 21. Ficha técnica SSD1306 (OLED 128 x 64 pixels)

Parámetro	Especificación
Modelo	SSD1306
Tipo de pantalla compatible	OLED monocromática
Resolución	128 x 64 píxeles
Memoria gráfica	GDDRAM integrada de 128 x 64 bits
Interfaz de comunicación	I^2C, SPI, Paralelo 6800-8080
Alimentación lógica (VDD)	1.65-3.3 V
Alimentación de panel (VCC)	7-15 V
Control de brillo	256 niveles de contraste
Temperatura de operación	-40 °C a +85 °C

Fuente: Elaborado a partir de Solomon Systech Limited [51].

Módulo lector MicroSD

El módulo lector de memoria MicroSD es un dispositivo diseñado para almacenar y leer información mediante tarjetas MicroSD utilizando la interfaz de comunicación SPI. Incorpora un regulador de voltaje y un conversor de niveles lógicos MC74VHCT125A/74LVC125A, lo que permite su funcionamiento con sistemas de 3.3 V y 5 V [52]. En esta investigación se empleó para almacenar en una tarjeta MicroSD los datos registrados por el sistema de adquisición de datos implementado con el ESP32.

Tabla 22. Ficha técnica módulo lector MicroSD

Parámetro	Especificación
Modelo	Módulo lector de memoria MicroSD
Voltaje de operación	3.3-5 V
Interfaz de comunicación	SPI
Pines de comunicación	MOSI, MISO, SCK, CS
Tarjetas compatibles	MicroSD y MicroSDHC
Conversor lógico	MC74VHCT125A / 74LVC125A
Dimensiones	42 x 24 mm

Fuente: Elaborado a partir de Naylamp Mechatronics [52].

Reductor XL4015

El XL4015 es un convertidor reductor de tensión (Buck DC-DC) de alta eficiencia con tecnología PWM de frecuencia fija de 180 kHz, diseñado para suministrar corrientes de salida de hasta 5 A. Incorpora un MOSFET de potencia interno y funciones de protección contra sobrecorriente, cortocircuito y sobretemperatura, permitiendo una regulación estable del voltaje de salida [53]. En esta investigación se utilizó para estabilizar el voltaje de alimentación del sensor de corriente ACS758 y el GPS NEO M8.

Tabla 23. Ficha técnica del reductor XL4015

Parámetro	Especificación
Modelo	XL405
Tipo	Convertidor DC-DC reductor (Buck)
Voltaje de entrada	8-36 V DC
Voltaje de salida	Ajustable de 1.25 a 32 V DC
Corriente máxima de salida	5 A
Frecuencia de conmutación	180 kHz
Eficiencia máxima	Hasta 96 %
Protección	Sobrecorriente, cortocircuito y sobretemperatura
Encapsulado	TO263-5L

Fuente: Elaborado a partir de XLSEMI [53].

Power bank portátil 20000 mAh

El power bank BIBOSHI PO3 es una fuente de alimentación portátil con una capacidad nominal de 20000 mAh, diseñada para suministrar energía a dispositivos electrónicos mediante puertos USB de 5V. En esta investigación se utilizó como fuente de alimentación externa del sistema de adquisición de datos durante los recorridos experimentales, garantizando el funcionamiento continuo del ESP32 y los módulos electrónicos asociados.

Tabla 24. Ficha técnica Power bank BIBOSHI

Parámetro	Especificación
Marca	BIBOSHI
Modelo	PO3
Tipo	Power bank portátil
Capacidad nominal	20000 mAh
Entrada	Micro USB / USB Tipo C, 5V ⎓ 2.1 A
Salida	USB-A, 5V ⎓ 2.1 A
Puertos de salida	2 x USB-A
Puertos de entrada	Micro USB y USB Tipo C
Indicador de carga	Pantalla digital LED/LCD

Software empleado

Tabla 25. Software utilizado durante la investigación

Software	Aplicación
Arduino IDE	Desarrollo y programación del firmware del microcontrolador.
MATLAB	Procesamiento, análisis y visualización de los datos registrados durante los recorridos experimentales.
Google Earth Pro	Verificación de recorridos, altitudes y trazado de las rutas experimentales.
KiCad	Diseño del esquemático electrónico y de la placa de circuito impreso (PCB) del sistema DAQ.
Microsoft Excel	Organización preliminar y verificación de los datos registrados.
Microsoft Word	Elaboración y edición del documento de tesis.

3.8 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental comprendió una serie de etapas destinadas a garantizar la obtención de datos válidos y confiables durante los ensayos de campo. Estas etapas abarcaron desde la preparación del vehículo y la verificación del sistema de adquisición de datos hasta la

ejecución de las rutas experimentales y el procesamiento de la información registrada para su posterior análisis.

3.8.1 Desarrollo de los ensayos experimentales

Preparación del ensayo

Antes de cada ensayo se verificó que el banco de baterías de la motocicleta se encontrara completamente cargado (100 % de estado de carga). Asimismo, se comprobó la presión de los neumáticos, manteniendo valores de 20 PSI en la rueda delantera y 25 PSI en la rueda trasera durante todas las pruebas.

Posteriormente, la motocicleta fue ubicada en el punto de partida y se encendió el sistema de adquisición de datos (DAQ). Durante su inicialización, el sistema ejecutó automáticamente la calibración del offset del sensor de corriente y de la unidad de medición inercial (MPU9250), por lo que la motocicleta permaneció apagada y en posición vertical hasta finalizar este proceso.

Antes de iniciar el recorrido se verificó que el receptor GPS registrara una solución de posicionamiento válida, para lo cual el sistema requería la detección de al menos seis satélites. Una vez completada la inicialización del DAQ, se encendió la motocicleta y comenzó el registro de datos.

Ejecución del ensayo

Todos los ensayos fueron realizados por el mismo conductor, procurando mantener un estilo de conducción uniforme y evitando aceleraciones o frenadas bruscas siempre que las condiciones del tránsito lo permitieran. Durante todas las pruebas se utilizó casco de protección; en los ensayos con acompañante (Ruta 1 y Ruta 4), ambos ocupantes utilizaron el equipo de seguridad correspondiente.

Finalización del ensayo

Al finalizar cada recorrido se apagó el DAQ, quedando los datos almacenados en la tarjeta microSD. Posteriormente, la motocicleta permaneció en reposo durante aproximadamente una hora antes de iniciar la recarga del banco de baterías. Durante este intervalo se retiró la tarjeta microSD para respaldar y organizar los archivos obtenidos. Una vez completada la recarga, la motocicleta permaneció nuevamente en reposo durante

aproximadamente una hora para estabilizar el voltaje del banco de baterías antes de iniciar el siguiente ensayo.

3.8.2 Procesamiento de datos

Los datos registrados por el sistema de adquisición fueron almacenados en archivos con formato CSV y posteriormente procesados en MATLAB. El procesamiento tuvo como objetivo depurar la información registrada, calcular las variables de interés y obtener los indicadores empleados para el análisis de la autonomía de la motocicleta eléctrica.

Importación y preparación de los datos

Aquí se verificó la correcta importación de todas las variables registradas, entre ellas el voltaje, la corriente, el estado de carga de la batería, la velocidad, la distancia recorrida, la aceleración, la altitud, la temperatura, la presión atmosférica y la humedad relativa.

Posteriormente, las variables fueron preparadas para su análisis mediante la conversión de los datos al formato numérico correspondiente. Asimismo, los registros de tiempo fueron transformados a una escala temporal continua expresada en segundos, tomando como referencia el inicio de cada ensayo, con el propósito de sincronizar las diferentes variables registradas y facilitar los cálculos realizados en las etapas posteriores.

Tratamiento de datos

Una vez importados los datos, las señales registradas fueron sometidas a un proceso de tratamiento con el fin de reducir el efecto del ruido y eliminar variaciones no representativas. Para ello, se aplicaron técnicas de filtrado mediante promedio móvil y suavizado a las variables de corriente, aceleración y altitud, obteniendo señales más estables.

3.8.3 Cálculo de variables

A partir de las señales previamente tratadas, se calcularon los indicadores necesarios para evaluar el desempeño energético de la motocicleta eléctrica durante cada ensayo. Entre ellas se incluyen la pendiente del recorrido, el desnivel acumulado, la potencia eléctrica, la energía consumida y regenerada, el consumo específico y la capacidad extraída de la batería.

Pendiente del recorrido

La pendiente del recorrido se determinó a partir de la variación de la altitud con respecto a la distancia recorrida, expresándose como porcentaje de inclinación de la vía.

$$p = \frac{\Delta h}{\Delta d} \cdot 100 \tag{1}$$

Donde:

- p: Pendiente de la vía (%)
- Δh: Variación de altitud, calculada entre el punto final y el inicial (m)
- Δd: Distancia horizontal recorrida (m)

Desnivel acumulado positivo y negativo

El desnivel acumulado se obtuvo mediante la suma de las variaciones positivas y negativas de la altitud registradas durante el recorrido, permitiendo cuantificar la ganancia y pérdida de elevación.

Ganancia de elevación:

$$D_{pos} = \sum_{i=1}^{n} \Delta h_i \qquad para \qquad \Delta h_i > \epsilon \tag{2}$$

Pérdida de elevación:

$$D_{neg} = \sum_{i=1}^{n} |\Delta h_i| \qquad para \qquad \Delta h_i < -\epsilon \tag{3}$$

Donde:

- D_{pos}: Desnivel acumulado positivo (m)
- D_{neg}: Desnivel acumulado negativo (m)
- Δh_i: Variación de altitud entre dos puntos de muestreo (m)
- ϵ: Umbral de tolerancia de ruido altimétrico (m)

Potencia eléctrica instantánea

La potencia eléctrica instantánea se calculó a partir del producto entre el voltaje de la batería y la corriente demandada por el sistema de tracción

$$P(t) = V(t) \cdot I(t) \tag{4}$$

Donde:

- $P(t)$: Potencia eléctrica instantánea (W)
- $V(t)$: Voltaje instantáneo del banco de baterías (V)
- $I(t)$: Corriente instantánea demandada o regenerada (A)

Energía eléctrica consumida y regenerada

Para evaluar con precisión el balance energético a partir de los datos discretos muestreados por el DAQ, se aplica la integración numérica mediante la regla del trapecio, separando la tracción del freno regenerativo.

Energía de Tracción:

$$E_{cons} = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{P_{cons,i} + P_{cons,i+1}}{2} \right) \Delta t_i \tag{5}$$

Energía Regenerada:

$$E_{regen} = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{P_{regen,i} + P_{regen,i+1}}{2} \right| \Delta t_i \tag{6}$$

Donde:

- E_{cons}: Energía eléctrica total consumida por el motor (Wh)
- E_{regen}: Energía eléctrica total recuperada por el controlador (Wh)
- $P_{cons,i}$: Potencia eléctrica instantánea positiva en la muestra i (W)
- $P_{regen,i}$: Potencia eléctrica instantánea negativa en la muestra i (W)

- Δt_i: Intervalo de tiempo entre dos muestras consecutivas, calculado como $(t_{i+1} - t_i)$ en segundos (s)
- n: Número total de muestras registradas
- 3600: Factor de conversión de segundos a horas

Consumo específico de energía

El consumo específico se calculó como la relación entre la energía neta consumida y la distancia recorrida, expresándose en Wh/km.

$$C_{esp} = \frac{E_{consumida} - E_{regenerada}}{d} \tag{7}$$

Donde:

- C_{esp}: Consumo específico (Wh/km)
- $E_{consumida}$: Energía eléctrica consumida en ruta (Wh)
- $E_{regenerada}$: Energía eléctrica regenerada en ruta (Wh)
- d: Distancia total recorrida (km)

Capacidad de descarga acumulada

$$C_{entregada} = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{I_{desc,i} + I_{desc,i+1}}{2} \right) \Delta t_i \tag{8}$$

Donde:

- $C_{entregada}$: Capacidad total que el banco de baterías entregó al motor (Ah)
- $I_{desc,i}$: Corriente de descarga instantánea registrada en la muestra i (A)
- Δt_i: Intervalo de tiempo entre muestras (s)

Indicadores críticos de pendiente (Máximos y promedios)

Pendientes máximas

Máximo ascenso:

$$P_{max}^{+} = \max(p_i) \quad para\ p_i > 0 \tag{9}$$

Máximo descenso:

$$P_{max}^{-} = \min(p_i) \quad para\ p_i < 0 \tag{10}$$

Donde:

- P_{max}^{+}: Pendiente máxima registrada en ascenso (%)
- P_{max}^{-}: Pendiente máxima registrada en descenso (%)
- p_i: Valores instantáneos del vector de pendientes calculadas en la ruta (%)

Pendiente promedio

Inclinación media en ascenso:

$$\bar{p}^{+} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} p_i \quad para\ p_i > \epsilon \tag{11}$$

Donde:

- $\bar{p}^{+}$: Pendiente promedio de los tramos en ascenso (%)
- p_i: Valores instantáneos de pendiente en subida (%)
- m: Número total de puntos de muestreo registrados en subida
- ϵ: Umbral de tolerancia de inclinación

Inclinación media en descenso:

$$\bar{p}^{-} = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} p_j \quad para\ p_j < -\epsilon \tag{12}$$

Donde:

- $\bar{p}^{-}$: Pendiente promedio de los tramos en descenso (%)
- p_j: Valores instantáneos de pendiente en bajada (%)
- k: Número total de puntos de muestreo registrados en bajada
- ϵ: Umbral de tolerancia de inclinación

Estado de carga (Estimación por conteo de Coulomb)

Es estado de carga de la batería fue estimado mediante el método de conteo de Coulomb implementado en el sistema de adquisición de datos. Este procedimiento permitió determinar el porcentaje de carga disponible durante cada ensayo.

$$SoC(t) = SoC_0 - \left(\frac{C_{entregada}}{C_{nominal}}\right) \times 100 \quad (13)$$

Donde:

- $SoC(t)$: Estado de carga actual de la batería (%)
- SoC_0: Estado de carga inicial al comenzar el recorrido (%)
- $C_{entregada}$: Capacidad acumulada extraída del banco de baterías (Ah)
- $C_{nominal}$: Capacidad nominal del banco de baterías

Con base a la metodología descrita, se establecieron las condiciones de medición y los instrumentos empleados para obtener indicadores energéticos comparables entre rutas. La definición del área de estudio y la selección de recorridos permitieron estructurar escenarios con diferentes demandas topográficas y condiciones de circulación.

1CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos durante los recorridos experimentales realizados en el cantón Ibarra con la motocicleta eléctrica modelo Torino Racer, instrumentada mediante un sistema de adquisición de datos (DAQ) desarrollado para esta investigación. Los registros obtenidos permitieron evaluar el comportamiento eléctrico, energético, operativo, topográfico y ambiental del vehículo bajo condiciones reales de conducción.

En primera instancia, se describe la implementación y validación del sistema de adquisición de datos empleado durante los ensayos experimentales, verificando su capacidad para registrar de forma sincronizada las variables de interés. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos en las diferentes rutas de ensayo mediante indicadores como la capacidad extraída, el estado de carga de la batería, la energía consumida, la energía regenerada y el rendimiento energético. Finalmente, se analiza la influencia de la topografía sobre el consumo energético y la autonomía de la motocicleta, contrastando los resultados experimentales con los antecedentes y fundamentos teóricos desarrollados en los capítulos anteriores.

4.1 Implementación y validación del sistema DAQ

El sistema de adquisición de datos DAQ constituye el elemento central de la etapa experimental de esta investigación, ya que permitió registrar de forma sincronizada las variables eléctricas, operativas, topográficas y ambientales durante los recorridos realizados en condiciones reales de operación. Su desarrollo comprendió el diseño electrónico del hardware, la integración de sensores, la implementación del software de adquisición y la verificación del funcionamiento conjunto de todos los subsistemas, garantizando la confiabilidad de los datos empleados en el análisis experimental posterior.

4.1.1 Arquitectura y diseño del sistema DAQ

Para la ejecución de las pruebas experimentales, se desarrolló un sistema de adquisición de datos (DAQ) basado en el microcontrolador ESP32, diseñado para registrar de manera simultánea las variables eléctricas, operativas, topográficas y ambientales asociadas al

funcionamiento de la motocicleta eléctrica. El diseño del sistema se fundamentó en una arquitectura modular que facilita la integración de múltiples sensores mediante diferentes protocolos de comunicación, garantizando estabilidad, sincronización y continuidad en la adquisición de datos durante los recorridos experimentales. El diseño electrónico, el diagrama esquemático de interconexiones y la tarjeta de circuito impreso (PCB) fueron desarrollados utilizando el software KiCad 9.0.

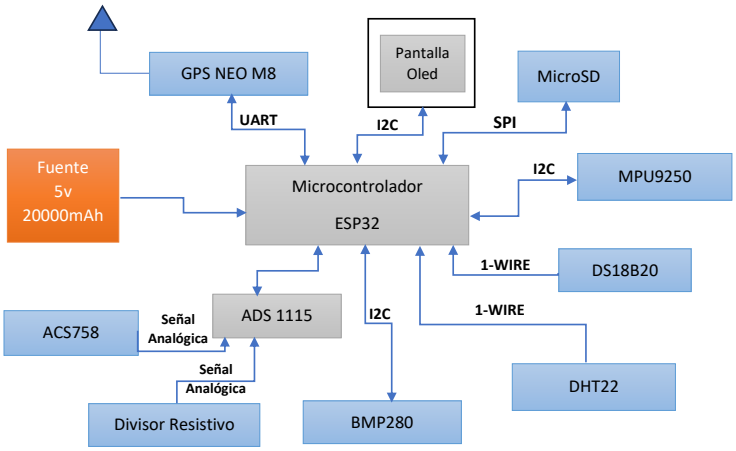


Figura 11. Arquitectura general y protocolos de comunicación del sistema de adquisición de datos.

La Figura 11 presenta la arquitectura funcional del sistema de adquisición desarrollado para esta investigación. El ESP32 constituye la unidad central de procesamiento, encargada de coordinar la comunicación con los diferentes sensores mediante los protocolos UART, I^2C, SPI y 1-Wire, así como de procesar, visualizar y almacenar la información adquirida durante los recorridos experimentales. Esta arquitectura permitió integrar de forma sincronizada variables eléctricas, operativas, topográficas y ambientales, proporcionando una plataforma robusta para la adquisición continua de datos en condiciones reales de operación.

Unidad central de procesamiento

El ESP32 constituye la unidad central del sistema de adquisición de datos. Este microcontrolador coordina la comunicación con los diferentes sensores, realiza el procesamiento de las señales adquiridas y administra el almacenamiento de la información en

la memoria MicroSD. Además, controla la visualización de los datos en la pantalla OLED durante la ejecución de los ensayos.

Adquisición de variables eléctricas

Para la adquisición de las variables eléctricas se implementó un sensor de efecto Hall ACS758 (±50 A), utilizado para medir la corriente del banco de baterías tanto durante la descarga como durante la regeneración de energía. El voltaje se midió mediante un divisor resistivo formado por resistencias de 330 kΩ y 10 kΩ, acompañado de un condensador cerámico de 0.1 µF para reducir el ruido de la señal. Ambas señales fueron adquiridas mediante un convertidor analógico-digital ADS1115 de 16 bits, comunicado con el ESP32 a través del protocolo I^2C. Adicionalmente, la temperatura del banco de baterías se registró mediante un sensor digital DS18B20.

Posicionamiento y dinámica del vehículo

Las variables de posición, velocidad y tiempo se registraron mediante un receptor GNSS u-blox NEO-M8N, mientras que las aceleraciones del vehículo fueron medidas con una unidad de medición inercial (IMU) MPU-9250. Ambos dispositivos proporcionan la información necesaria para el análisis dinámico y el procesamiento posterior de los recorridos experimentales.

Monitoreo ambiental

Las condiciones ambientales fueron registradas mediante un sensor BMP280 para la medición de la presión atmosférica y un sensor DHT22 para la medición de la temperatura ambiente y la humedad relativa. La información obtenida complemento el análisis de las condiciones de operación durante cada recorrido.

Alimentación del sistema

La alimentación del sistema se diseñó para suministrar los niveles de tensión requeridos por cada dispositivo, incorporando un regulador LM317 para garantizar una alimentación estable del sensor ACS758. Esta configuración permitió el funcionamiento simultáneo de todos los módulos durante los ensayos experimentales.

Visualización y almacenamiento

La información adquirida fue almacenada de forma continua en una memoria MicroSD para su procesamiento posterior en MATLAB. Paralelamente, una pantalla OLED permitió visualizar en tiempo real las principales variables registradas, facilitando la supervisión del funcionamiento del sistema durante las pruebas de campo.

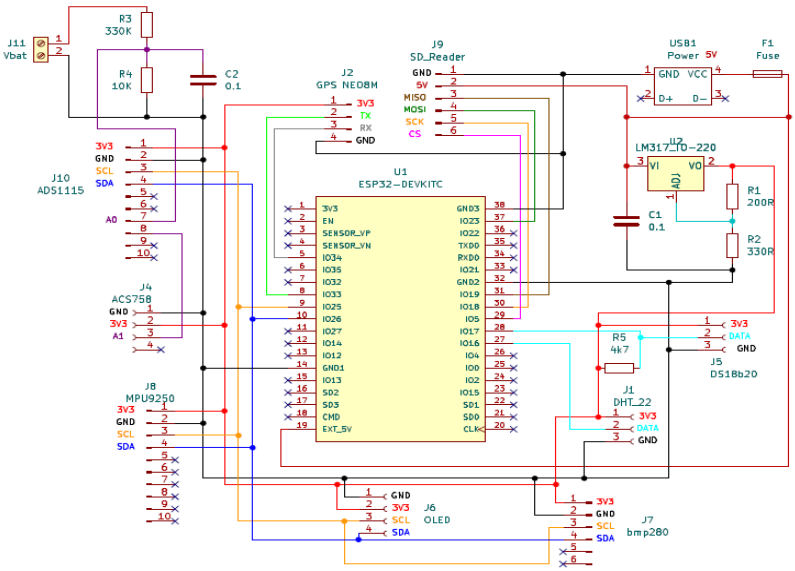


Figura 12. Diagrama esquemático de interconexiones eléctricas y de datos del sistema DAQ.

La Figura 12 presenta el diagrama esquemático del sistema de adquisición de datos, donde se muestran las conexiones eléctricas entre el ESP32, los sensores, los módulos de adquisición y los elementos de almacenamiento y visualización. El diseño se organizó considerando la compatibilidad de voltajes, la distribución de los protocolos de comunicación y la disponibilidad de los pines del microcontrolador, con el propósito de facilitar la integración del hardware y garantizar un funcionamiento estable durante las pruebas experimentales.

A partir del diagrama esquemático se diseñó la tarjeta de circuito impreso (PCB), con el propósito de integrar los componentes en una única placa y reducir el cableado necesario para la instalación del sistema sobre la motocicleta.

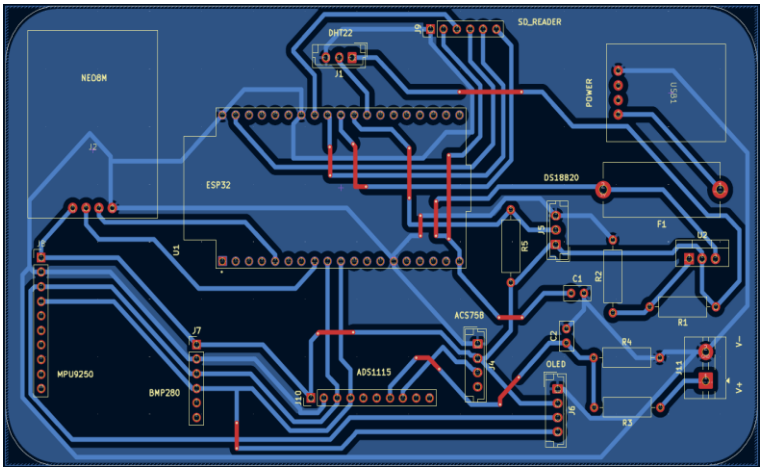


Figura 13. Diseño de la placa de circuito impreso (PCB) del sistema de adquisición de datos (DAQ).

La Figura 13 muestra el diseño de la tarjeta de circuito impreso desarrollada para el sistema DAQ. La implementación de la PCB permitió organizar las conexiones entre los diferentes módulos, reducir el uso de cableado externo y mejorar la estabilidad mecánica y eléctrica del sistema durante los recorridos experimentales. Además, facilitó el montaje de los componentes y el mantenimiento del sistema en caso de requerir ajustes o reemplazos.

4.1.2 Montaje físico e integración en el vehículo

Una vez fabricada la tarjeta de circuito impreso (PCB), se inició la integración física del sistema de adquisición sobre la motocicleta eléctrica. Durante esta etapa se realizó un montaje preliminar utilizando una caja plástica comercial, con el propósito de verificar el funcionamiento de los módulos electrónicos, definir la distribución de los componentes y evaluar el recorrido del cableado antes de construir el encapsulado definitivo.

Montaje preliminar

Durante esta etapa se realizó el montaje preliminar del sistema de adquisición de datos con el propósito de verificar el funcionamiento conjunto del ESP32, los sensores y los módulos electrónicos. En la Figura 14 se presenta el prototipo inicial del sistema empleado en la etapa de validación de instrumentos.

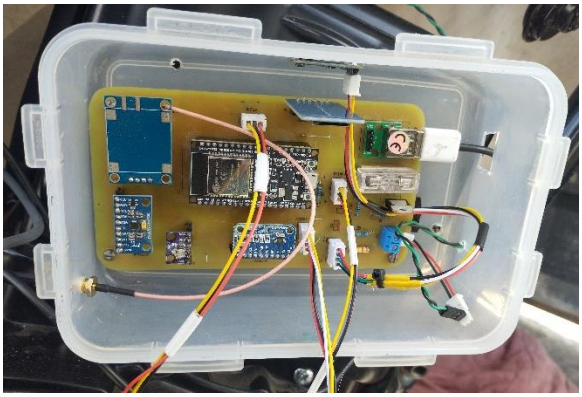


Figura 14. Montaje preliminar del sistema DAQ durante las pruebas de integración.

Construcción del encapsulado definitivo

Una vez validado el prototipo preliminar, se procedió a la construcción del encapsulado definitivo del sistema. En la Figura 15 se muestra el proceso de fabricación de la carcasa de acrílico utilizada para alojar la PCB y los demás componentes electrónicos.

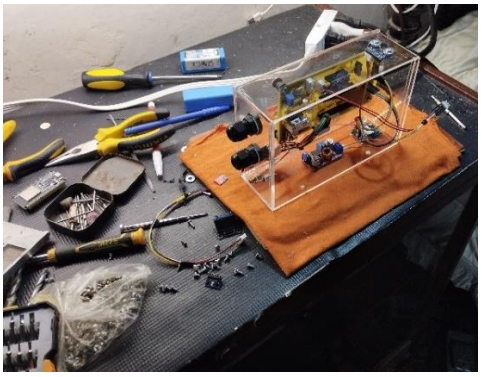


Figura 15. Construcción del encapsulado definitivo del sistema DAQ.

Una vez verificado el funcionamiento del sistema, se procedió a la fabricación de una carcasa de acrílico adaptada a las dimensiones de la PCB y de los módulos electrónicos, con el propósito de proporcionar protección mecánica al sistema y facilitar su instalación en la motocicleta. Durante esta etapa se realizó el montaje de los conectores, la organización del cableado y la instalación de los diferentes componentes antes del ensamblaje final del equipo.

Montaje definitivo

Finalizada la construcción del encapsulado, se procedió al ensamblaje del sistema DAQ definitivo. En la Figura 16 se presenta el sistema completamente armado y listo para la instalación en la motocicleta.

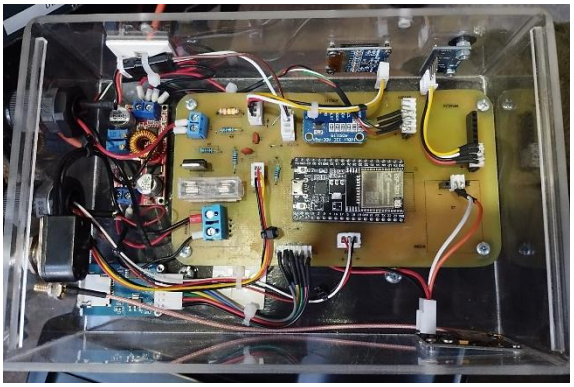


Figura 16. Sistema DAQ ensamblado en su encapsulado.

El ensamblaje definitivo permitió integrar todos los módulos electrónicos dentro del encapsulado, garantizando su protección mecánica y facilitando la instalación del sistema en la motocicleta.

Integración en la motocicleta

Una vez ensamblado el sistema DAQ se procedió a su instalación en la motocicleta eléctrica. En la Figura 17 se muestra la ubicación final del sistema sobre el vehículo.

Figura 17. Sistema de adquisición de datos (DAQ) instalado en la motocicleta eléctrica.

Finalmente, el sistema DAQ fue instalado en la motocicleta eléctrica en una ubicación que facilitó el acceso a las conexiones y protegió el equipo frente a vibraciones y exposición ambiental durante los recorridos experimentales.

La ubicación de los principales sensores externos y su función dentro del sistema se resume en la Tabla 26.

Tabla 26. Distribución de los sensores externos del sistema DAQ en la motocicleta eléctrica.

Elemento	Ubicación	Justificación
Antena GNSS	Exterior de la carcasa en la parte trasera de la motocicleta.	Mejor recepción de la señal satelital
BMP280 y DHT22	Exterior	Medición de las condiciones ambientales.
DS18B20	Compartimiento del banco de baterías	Medición de la temperatura de operación de las baterías.
ACS758	Línea de alimentación del banco de baterías	Medición de la corriente del sistema de tracción

Los módulos de procesamiento permanecieron protegidos dentro de la carcasa, mientras que los sensores que requerían contacto directo con el ambiente o con el sistema eléctrico del vehículo fueron instalados externamente para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

4.1.3 Lógica de operación del sistema DAQ

El firmware del sistema DAQ fue desarrollado para el microcontrolador ESP32 bajo una arquitectura de ejecución continua (Main Loop), con el objetivo de garantizar una adquisición secuencial y sincronizada de las variables registradas durante los recorridos experimentales. El programa inicia con una etapa de configuración (Setup), en la que se inicializan los protocolos de comunicación I^2C, SPI, UART y 1-Wire, además de verificar el funcionamiento de la memoria MicroSD y de los diferentes módulos conectados al sistema.

La Figura 18 presenta el diagrama de flujo correspondiente al proceso de inicialización del sistema, donde se ejecutan la configuración de los periféricos, la verificación del funcionamiento de los sensores, la calibración de los módulos de medición y la estimación inicial del estado de carga (SoC) antes de iniciar la adquisición de datos.

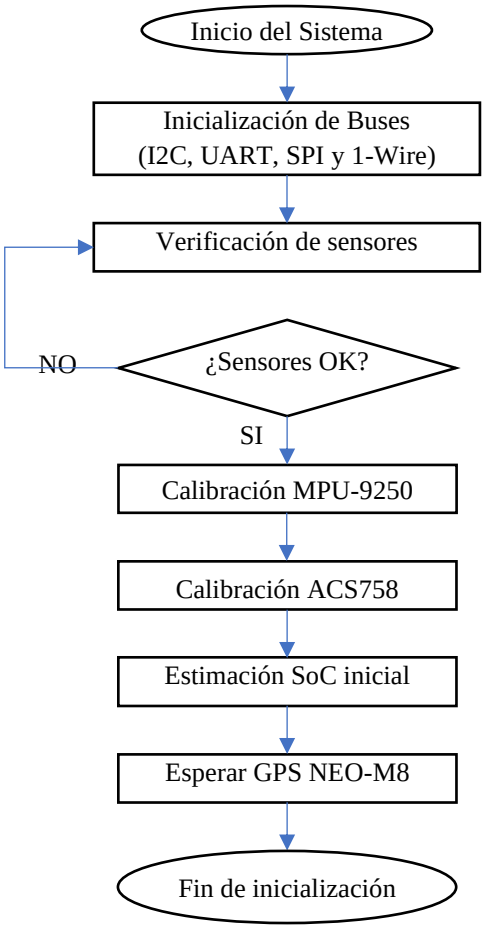


Figura 18. Diagrama de flujo del proceso de inicialización del sistema (Setup).

Una vez completada la etapa de inicialización, el programa ingresa al bucle principal (Loop), en el cual se realiza continuamente la lectura de los sensores, el procesamiento de las variables medidas, la actualización del estado de carga mediante conteo de coulombs, el cálculo de la distancia recorrida, el almacenamiento periódico de la información en la tarjeta MicroSD y la actualización de la pantalla OLED. Este proceso se repite de forma indefinida durante toda la ejecución del sistema. En la Figura 19 se presenta el diagrama de flujo correspondiente a la secuencia de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos ejecutada durante el bucle principal del programa.

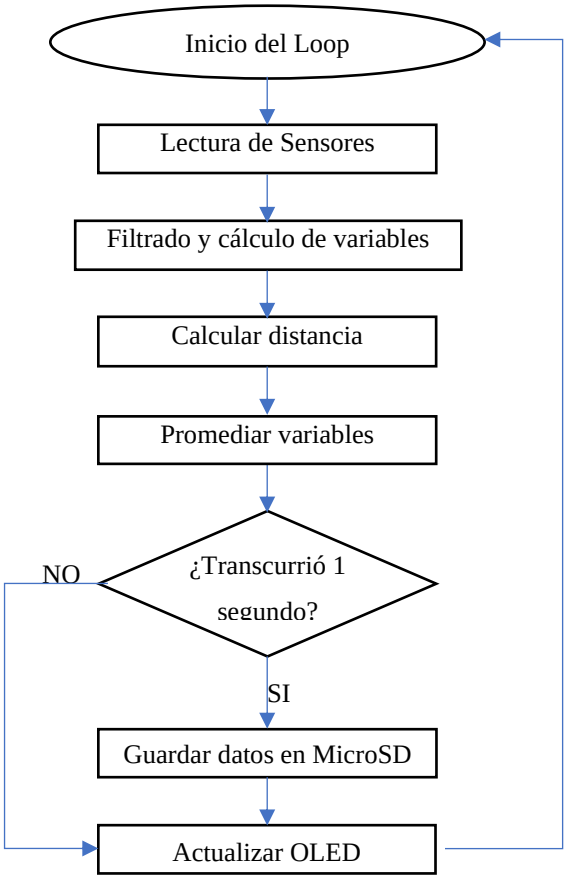


Figura 19. Diagrama de flujo del proceso de adquisición y almacenamiento de datos (Loop).

4.1.4 Validación experimental del sistema DAQ

Previo a la ejecución de las pruebas dinámicas en ruta, se realizó la validación experimental del sistema DAQ mediante pruebas estáticas y pruebas en vacío, con el propósito de verificar la precisión de las variables registradas y evaluar el desempeño de los sensores frente a instrumentos de referencia. Esta etapa permitió comprobar la confiabilidad del sistema antes de iniciar la adquisición de datos en condiciones reales de operación.

Las pruebas estáticas se emplearon para validar el voltaje, la presión atmosférica, la altitud, la inclinación y la aceleración en reposo, mientras que las pruebas en vacío permitieron verificar la respuesta del sistema durante el funcionamiento de la motocicleta sin carga mecánica.

Para la validación de las variables eléctricas (voltaje y corriente), las mediciones obtenidas mediante el ADS1115 y el sensor ACS758 se compararon con las registradas por una pinza amperimétrica digital ANENG ST212 en corriente continua (DC). La altitud y la presión atmosférica se verificaron utilizando como referencia un receptor GPS Garmin GPSMAP 64s. Por su parte, el módulo inercial MPU-9250 se validó mediante una prueba de inclinación con un ángulo conocido y mediante la lectura de la aceleración gravitacional en reposo, donde el eje Z, perpendicular al suelo debe registrar aproximadamente 1 g.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 27. Considerando que todas las variables presentaron errores relativos inferiores al 3%, el sistema se consideró suficientemente preciso para las pruebas experimentales desarrolladas en esta investigación.

Tabla 27. Validación experimental de las mediciones del sistema DAQ.

Parámetro	Método / Instrumento de referencia	Valor Referencia	Valor DAQ	Error Absoluto	Error Relativo(%)
Voltaje (V)	ANENG ST212 (Función voltímetro)	76.20	76.75	0.55 V	0.72 %
Corriente (A)	Pinza Amperimétrica ANENG ST212	1.33	1.36	0.03 A	2.25 %
Altitud (m s.n.m.)	Garmin GPSMAP 64s	2219	2218	1.00 m	0.04 %
Presión Atmosférica (hPa)	Garmin GPSMAP 64s	780.30	783.00	2.70 hPa	0.34 %
Inclinación (Grados)	Patrón de ángulo conocido	30.00	29.7	0.30	1.00 %
Aceleración Eje Z (g)	Gravedad Terrestre (reposo)	1.00	1.001	0.001	0.10 %

4.2 Resultados experimentales

4.2.1 Validación de la repetibilidad de los resultados

Con el fin de evaluar la repetibilidad de la metodología experimental y la consistencia de las mediciones obtenidas mediante el sistema de adquisición de datos, la Ruta 1 fue recorrida en tres ocasiones bajo condiciones operativas similares descritas en el Capítulo III.

La tabla 28 detalla el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV) capturados en las tres pruebas. Se utilizó el CV específicamente pata poder cruzar y comparar la dispersión de datos que manejan unidades muy distintas. Al revisar los parámetros eléctricos la dispersión fue mínima, ninguna de estas métricas superó el 4% de variación entre pruebas, lo que garantiza que el sistema de adquisición de datos registro la información con una precisión estable.

Tabla 28. Análisis de repetibilidad de la Ruta 1.

Parámetros	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio	Desv. Estándar	CV (%)
Distancia recorrida (km)	9.05	9.07	9.07	9.06	0.01	0.13
Altitud promedio (m s.n.m.)	2216	2221	2219	2219	2.67	0.12
Velocidad promedio (km/h)	22.6	19.13	19.58	20.44	1.89	9.23
Voltaje inicial (V)	79.5	79.43	80.02	79.65	0.32	0.40
Voltaje final (V)	77.00	76.80	76.93	76.91	0.10	0.13
Corriente promedio (A)	11.38	9.68	10.11	10.39	0.88	8.48
Energía Consumida (Wh)	350.76	346.84	359.44	352.35	6.45	1.83
Energía regenerada (Wh)	32.09	29.97	31.80	31.29	1.15	3.68
Estado de Carga Final (%)	82.20	82.10	81.70	82.00	0.26	0.32

4.2.2 Resultados experimentales de la Ruta 1: Circuito Urbano Mixto

La Ruta 1 corresponde al circuito urbano mixto definido como ruta de referencia para la presente investigación. De acuerdo con el Capítulo III, este recorrido fue seleccionado para validar el desempeño del sistema de adquisición de datos (DAQ) bajo condiciones reales de circulación y verificar la repetibilidad de la metodología experimental mediante la ejecución de ensayos repetidos. Debido a sus condiciones de operación representativas del entorno urbano y al predominio de pendientes moderadas, esta ruta constituye la base de comparación para el análisis de las demás rutas evaluadas, permitiendo identificar posteriormente la influencia de escenarios con mayores exigencias topográficas sobre el consumo energético y la autonomía de la moto eléctrica.

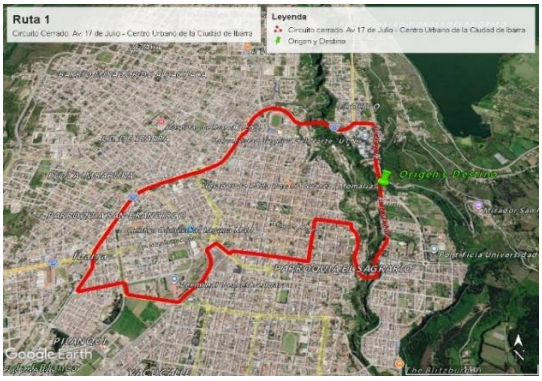


Figura 20. Recorrido geográfico de la Ruta 1.

La Figura 20 presenta el recorrido correspondiente a la Ruta 1, desarrollado en un circuito urbano cerrado dentro de la ciudad de Ibarra. El trayecto comprende vías con intersecciones, variaciones moderadas de pendiente y condiciones habituales de circulación vehicular, características que lo convierten en un escenario representativo del uso cotidiano de la motocicleta eléctrica. Debido a estas condiciones y a la repetibilidad demostrada previamente, este recorrido se adoptó como ruta base de referencia, a partir de la cual se comparan los resultados obtenidos en las demás rutas con diferentes niveles de exigencia topográfica.

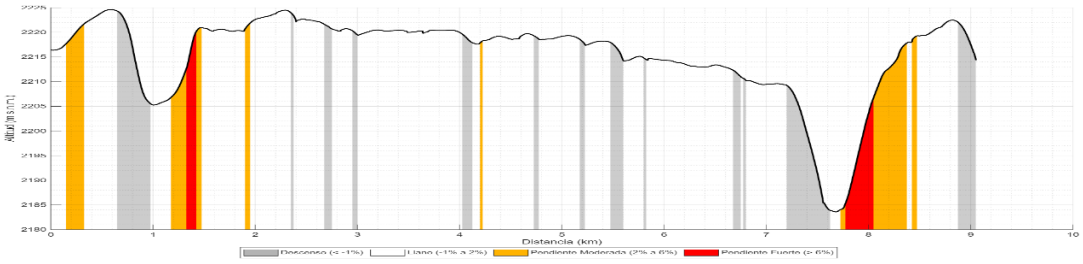


Figura 21. Perfil topográfico de la Ruta 1.

La Figura 21 muestra el perfil topográfico del circuito urbano mixto desarrollado en la ciudad de Ibarra. El recorrido presenta una altitud comprendida entre 2183 y 2225 m s.n.m., con una ganancia de elevación de 67 m y una pérdida de elevación de 68 m. Asimismo, la ruta está constituida por un 63.33 % de tramos planos, un 9.02 % de pendientes moderadas, un 3.96 % de pendientes fuertes y un 23.68 % de tramos en descenso, evidenciando un recorrido predominantemente plano con variaciones altimétricas moderadas. Estas características reducen la influencia de pendientes pronunciadas sobre la demanda energética del vehículo,

proporcionando un escenario adecuado para establecer el comportamiento energético de referencia de la motocicleta antes de analizar rutas con mayores exigencias topográficas.

Tabla 29. Resultados de las variables analizadas en la Ruta 1.

Variable	Valor Registrado
Distancia recorrida (km)	9.05
Tiempo de recorrido (min)	23 min 39 s
Velocidad promedio (km/h)	22.60
Velocidad máxima (km/h)	56.70
Altitud mínima (m s.n.m.)	2183
Altitud máxima (m s.n.m.)	2225
Ganancia de elevación (m)	67.14
Pérdida de elevación (m)	67.77
Pendiente promedio positiva (%)	2.42
Pendiente promedio negativa (%)	-2.38
Voltaje inicial (V)	79.50
Voltaje final (V)	77.00
Corriente promedio (A)	11.38
Potencia máxima (kW)	2.79
Estado de carga inicial (%)	100
Estado de carga final (%)	82.20
Consumo del estado de carga	17.80
Capacidad extraída (Ah)	4.89
Energía consumida (Wh)	350.76
Energía regenerada (Wh)	32.09
Consumo específico (Wh/km)	35.60

La Tabla 29 indica los resultados obtenidos de la Ruta 1, tuvo una longitud de 9.05 km, recorrida en 23 min 39s, con una velocidad promedio de 22.60 km/h. Desde el punto de vista energético, la motocicleta consumió 350.76 Wh, recuperó 32.09 Wh mediante frenado regenerativo, confirmando el funcionamiento del sistema de regeneración incluso en un recorrido con pendientes predominantemente moderadas. Se registró un consumo específico

neto de 35.60 Wh/km. El estado de carga disminuyó del 100% al 82,20 %, evidenciando un comportamiento energético estable durante el recorrido.

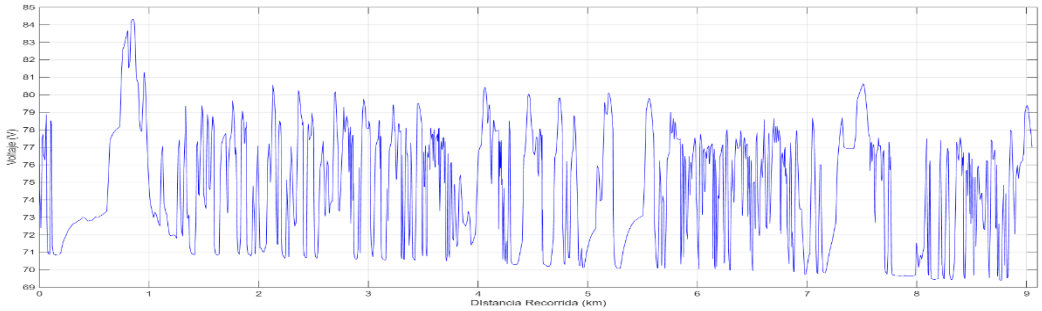


Figura 22. Perfil de voltaje de la Ruta 1

La Figura 22 presenta el comportamiento del voltaje del banco de baterías durante el recorrido de la Ruta 1. Se observan variaciones continuas de la tensión manteniendo una tendencia descendente desde 79.50 V hasta 77.00 V como consecuencia del consumo progresivo de energía del banco de baterías.

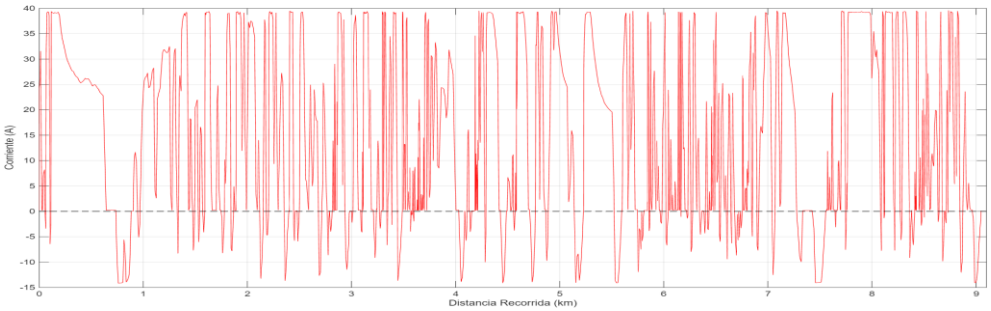


Figura 23. Perfil de corriente de la Ruta 1.

En la Figura 23 se puede apreciar que la corriente presentó variaciones continuas a lo largo del recorrido como respuesta a los cambios de la demanda del sistema de propulsión. Los valores positivos aumentaron durante las aceleraciones y los tramos de ascenso, debido al mayor esfuerzo requerido por el motor, mientras que los valores negativos corresponden a intervalos donde el sistema operó en modo regenerativo durante desaceleraciones y descensos.

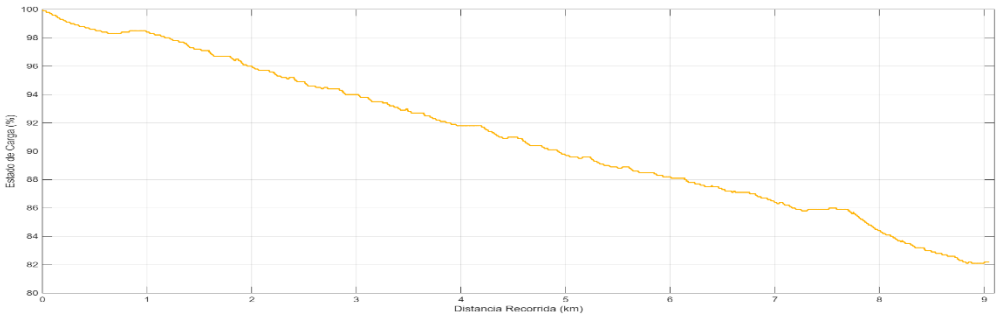


Figura 24. Perfil del estado de carga (SoC) en función de la distancia de la Ruta 1.

La Figura 24 presenta la evolución del estado de carga (SoC) durante el recorrido de la Ruta 1. Se observa una disminución progresiva desde el 100 % hasta el 82.20%, reflejando el consumo continuo de energía del banco de baterías a medida que aumenta la distancia recorrida. Aunque se aprecian ligeras reducciones en la velocidad de descarga en la pendiente de la curva SoC, asociadas a la recuperación parcial de energía mediante el sistema de frenado regenerativo, la tendencia general evidencia una reducción sostenida del estado de carga.

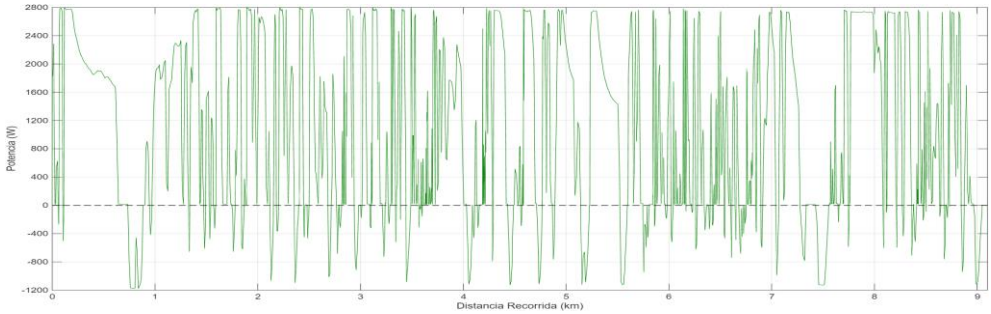


Figura 25. Perfil de la potencia instantánea de la Ruta 1.

La figura 25 muestra la variación de la potencia eléctrica instantánea durante el recorrido de la Ruta 1. Se observan incrementos de potencia en los tramos donde la motocicleta demandó mayor esfuerzo para acelerar o superar pendientes, alcanzando un valor máximo de 2.79 kW. Asimismo, se registran valores negativos de potencia durante los descensos y las desaceleraciones, evidenciando la recuperación parcial de energía mediante el sistema de frenado regenerativo. Estos resultados reflejan la influencia de las condiciones de conducción y la topografía sobre el comportamiento energético del vehículo.

En conjunto, los resultados obtenidos en la Ruta 1 establecen el comportamiento energético de referencia de la motocicleta eléctrica bajo condiciones representativas de circulación urbana. La baja dispersión observada en los ensayos de repetibilidad, junto con la estabilidad de las variables eléctricas y energéticas, confirma la consistencia de la metodología experimental y del sistema de adquisición de datos implementado. En consecuencia, los indicadores obtenidos en esta ruta constituyen la referencia experimental para comparar el efecto de escenarios con mayor pendiente, diferentes condiciones de circulación y mayores demandas energéticas analizados en las rutas posteriores.

4.2.3 Resultados experimentales de la Ruta 2

La Ruta 2 corresponde al corredor de ascenso continuo definido en el Capítulo III para evaluar la demanda máxima de energía bajo una condición de carga sostenida. A diferencia de la Ruta 1, donde se estableció el comportamiento energético de referencia de la motocicleta, este recorrido fue diseñado para analizar el efecto de un incremento progresivo de la pendiente sobre la demanda de corriente, la potencia, el consumo energético y la autonomía del vehículo. Debido a su perfil predominantemente ascendente, esta ruta permite aislar la influencia de la topografía como principal factor de incremento del consumo energético.

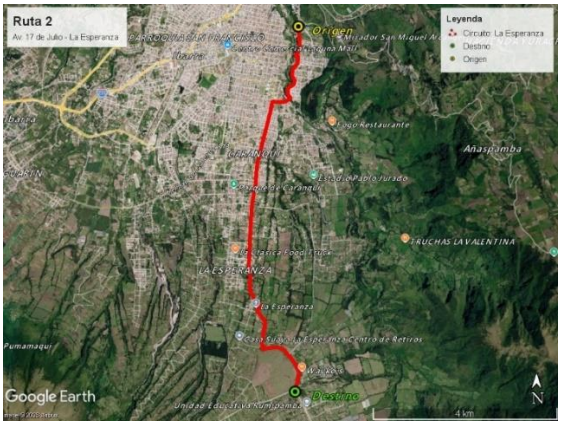


Figura 26. Recorrido geográfico de la Ruta 2.

En la Figura 26 se visualiza el recorrido desarrollado desde la zona urbana de Ibarra hasta la parroquia La Esperanza. El trayecto se caracterizó por un desplazamiento predominantemente ascendente, con una ganancia progresiva de elevación y pendientes

sostenidas a lo largo de gran parte del recorrido, constituyendo un escenario adecuado para evaluar el comportamiento del sistema de propulsión bajo condiciones de carga mecánica sostenida y elevada exigencia energética.

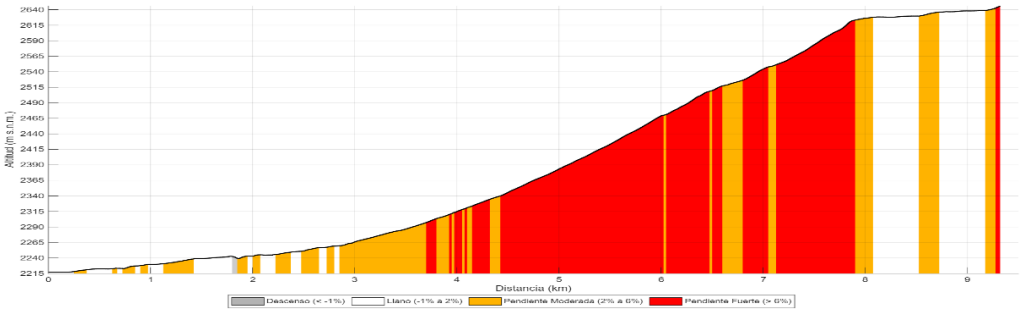


Figura 27. Perfil topográfico de la Ruta 2 con clasificación de la pendiente longitudinal.

La Figura 27 presenta el perfil topográfico de la Ruta 2. El recorrido estuvo conformado en un 34.97 % por pendientes moderadas, un 26.62 % por tramos planos, el 35.99 % de pendientes fuertes y una mínima presencia de descensos (2.42 %), evidenciando un trayecto predominante ascendente. La escasa presencia de tramos en descenso evidencia que la motocicleta permaneció durante la mayor parte del recorrido bajo una condición continua de ascenso, minimizando las oportunidades de recuperación energética mediante frenado regenerativo y aumentando la demanda sostenida del sistema de propulsión.

Tabla 30. Resultados de las variables analizadas en la Ruta 2.

Variable	Valor Registrado
Distancia recorrida (km)	9.32
Tiempo de recorrido (min)	21 min 48 s
Velocidad promedio (km/h)	25.41
Velocidad máxima (km/h)	47.70
Altitud mínima (m s.n.m.)	2217
Altitud máxima (m s.n.m.)	2646
Ganancia de elevación (m)	438.50
Pérdida de elevación (m)	12.90
Pendiente promedio positiva (%)	5.53
Pendiente promedio negativa (%)	-2.20

Variable	Valor Registrado
Voltaje inicial (V)	78.93
Voltaje final (V)	73.86
Corriente promedio (A)	22.22
Potencia máxima (kW)	2.75
Estado de carga inicial (%)	100.00
Estado de carga final (%)	67.70
Consumo del estado de carga	32.30
Capacidad extraída (Ah)	8.24
Energía consumida (Wh)	570.55
Energía regenerada (Wh)	12.51
Consumo específico (Wh/km)	60.04

.

La Tabla 30 resume los principales parámetros obtenidos durante la prueba experimental de la Ruta 2. En comparación con la Ruta 1, el consumo específico aumentó de 35.60 Wh/km a 60.04 Wh/km, evidenciando el efecto del ascenso continuo sobre la energía requerida para el desplazamiento. Como consecuencia, el voltaje del banco de baterías disminuyó de 78.93 V a 73.86 V, mientras que el estado de carga descendió del 100 % al 67.70 %, con una capacidad extraída de 8.24 Ah. La recuperación de 12.51 Wh mediante frenado regenerativo fue considerablemente menor que en la Ruta 1, debido a la escasa presencia de tramos en descenso.

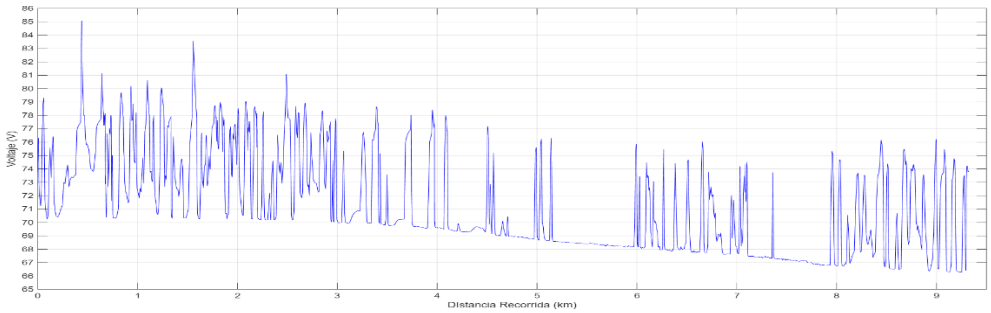


Figura 28. Perfil de voltaje de la Ruta 2.

La Figura 27 presenta el comportamiento del voltaje del banco de baterías durante el recorrido de la Ruta 2. Se observan fluctuaciones asociadas a la demanda de corriente y al

frenado regenerativo; sin embargo, predomina una caída de tensión sostenida desde 78.93 V hasta 73.86 V, superior a la registrada en la Ruta 1 debido al ascenso continuo.

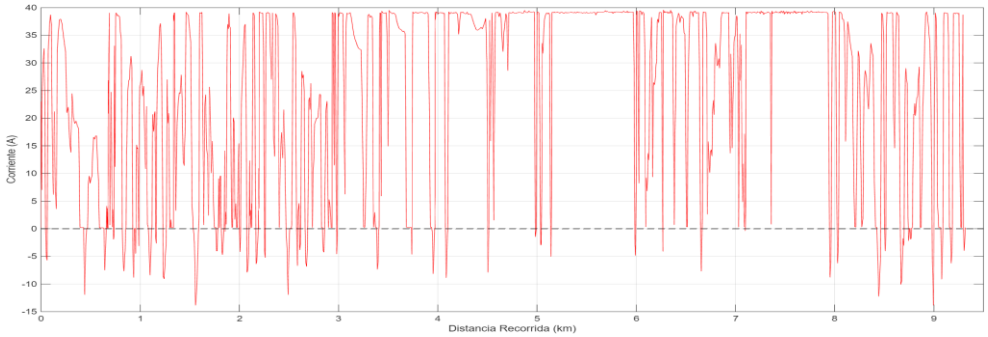


Figura 29. Perfil de la demanda de corriente de la Ruta 2.

La figura 29 presenta el comportamiento de la corriente durante la Ruta 2. Predominan corrientes cercanas a 40 A, evidenciando que el sistema de propulsión operó bajo una elevada demanda energética durante gran parte del ascenso. Los valores negativos, de hasta -13.87 A, corresponden al funcionamiento del sistema de frenado regenerativo en desaceleraciones y breves tramos de descenso.

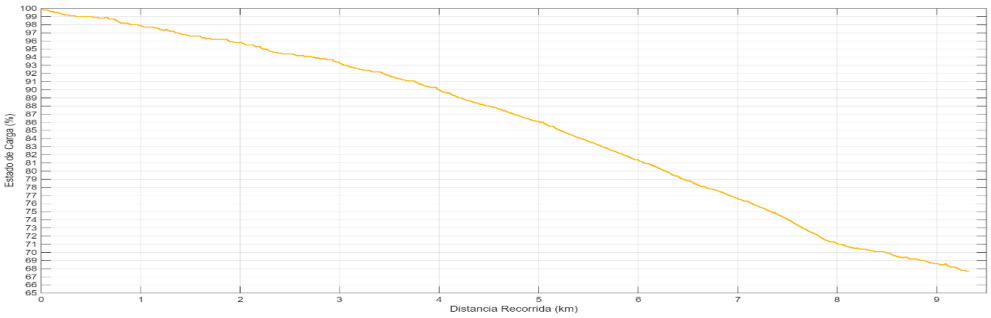


Figura 30. Perfil del estado de carga (SoC) en función de la distancia recorrida de la Ruta 2..

La Figura 30 muestra la evolución del estado de carga durante la Ruta 2. El SoC disminuyó de forma continua del 100 % al 67.70 %, evidenciando una mayor tasa de descarga que en la Ruta 1 como consecuencia de la elevada demanda energética impuesta por el ascenso sostenido.

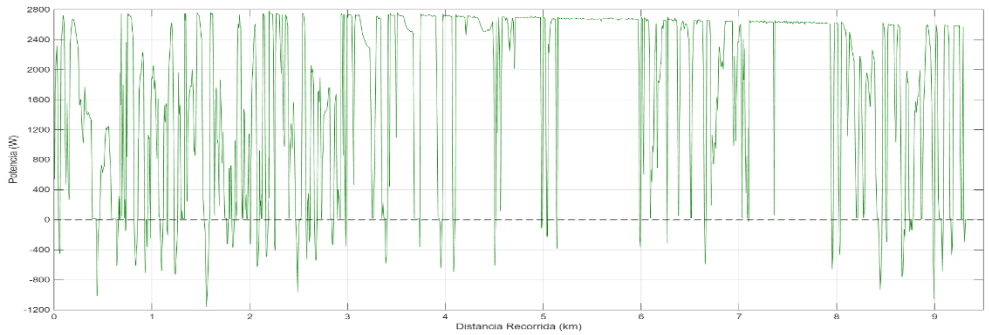


Figura 31. Perfil de la potencia instantánea de la Ruta 2.

La Figura 31 presenta la potencia instantánea durante la Ruta 2. Predominan valores positivos asociados al ascenso continuo, alcanzando una potencia máxima de 2.75 kW. Los valores negativos corresponden a la recuperación de energía mediante frenado regenerativo, confirmando que la topografía incrementa de forma sostenida la potencia demandada respecto a la Ruta 1.

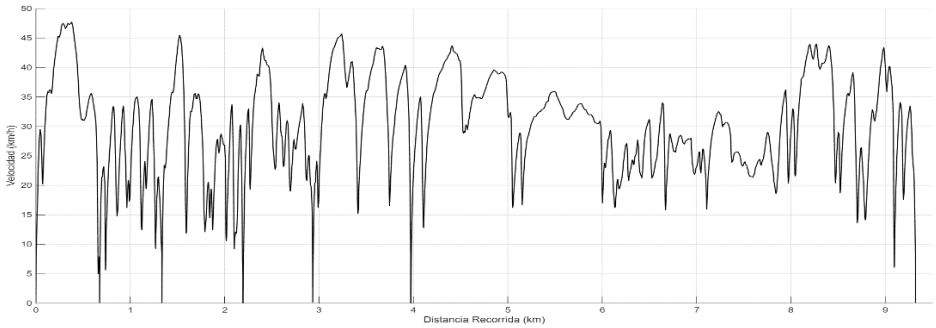


Figura 32. Perfil de la velocidad de la Ruta 2

La Figura 32 representa la variación de la velocidad durante la Ruta 2. Se observan disminuciones puntuales asociadas al tránsito y a las características de la vía, registrándose una velocidad máxima de 47.70 km/h y una velocidad promedio de 25.41 km/h. Estos resultados indican que el incremento del consumo energético estuvo asociado principalmente al ascenso continuo y no a un aumento significativo de la velocidad de circulación.

En conjunto, los resultados obtenidos en la Ruta 2 demuestran que el ascenso continuo incrementa significativamente la demanda energética de la motocicleta eléctrica. La mayor corriente, el incremento del consumo específico, la reducción más pronunciada del estado de

carga y la limitada recuperación de energía confirman la influencia de la topografía sobre el consumo energético y la autonomía del vehículo.

4.2.4 Resultados experimentales de la Ruta 3

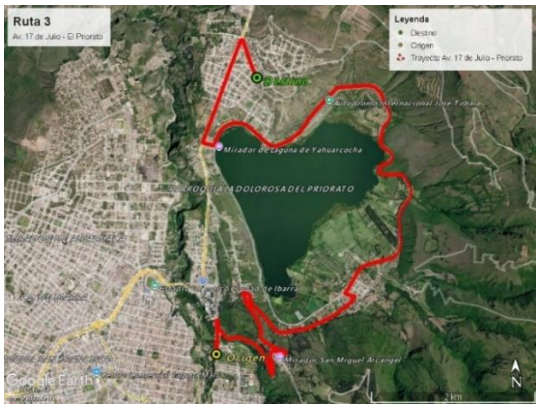


Figura 33. Recorrido geográfico de la Ruta 3.

En la Figura 33 se puede visualizar el recorrido geográfico de la Ruta 3, la cual corresponde a la travesía de perfil complejo definida en el Capítulo III para analizar la influencia de una topografía variable sobre el comportamiento energético de la motocicleta eléctrica y la recuperación de energía mediante el sistema de frenado regenerativo. A diferencia de la Ruta 2, caracterizada por un ascenso continuo, este recorrido combina ascensos, descensos y tramos planos, permitiendo evaluar la respuesta del sistema de propulsión ante cambios continuos de pendiente bajo condiciones reales de circulación.

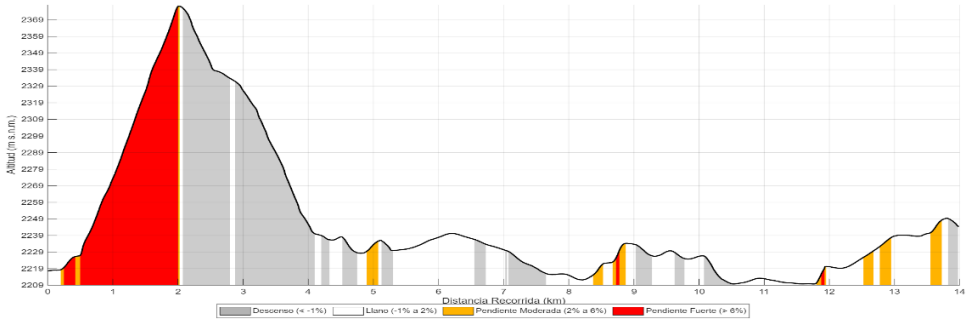


Figura 34. Perfil topográfico de la Ruta 3 con clasificación de la pendiente longitudinal.

La figura 34 presenta el perfil topográfico de la Ruta 3. El recorrido tuvo un 35.98 % de tramos planos, seguido con un 37.96 % por tramos en descenso, un 11.96 % de pendientes fuertes y el 14.10 % de pendientes moderadas. Esta distribución topográfica evidencia una

alternancia continua entre ascensos y descensos, proporcionando un escenario adecuado para analizar simultáneamente la demanda energética durante las pendientes positivas y la recuperación parcial de energía en los tramos descendentes.

Tabla 31. Resultados de las variables analizadas en la Ruta 3

Variable	Valor Registrado
Distancia recorrida (km)	13.99
Tiempo de recorrido (min)	22 min 41 s
Velocidad promedio (km/h)	36.82
Velocidad máxima (km/h)	60.30
Altitud mínima (m s.n.m.)	2205
Altitud máxima (m s.n.m.)	2386
Ganancia de elevación (m)	266.82
Pérdida de elevación (m)	238.40
Pendiente promedio positiva (%)	5.58
Pendiente promedio negativa (%)	-4.23
Voltaje inicial (V)	78.63
Voltaje final (V)	75.13
Corriente promedio (A)	16.56
Potencia máxima (kW)	2.71
Estado de carga inicial (%)	100.00
Estado de carga final (%)	74.90
Consumo del estado de carga	25.10
Capacidad extraída (Ah)	6.49
Energía consumida (Wh)	453.93
Energía regenerada (Wh)	17.97
Consumo específico (Wh/km)	32.23

La Tabla 31 resume los principales parámetros obtenidos durante la prueba experimental de la Ruta 3. Los resultados muestran un comportamiento energético inferior al observado en la Ruta 2 y superior al registrado en la Ruta 1, registrándose una corriente promedio de 16.56 A y una potencia máxima de 2.71 kW. El voltaje del banco de baterías disminuyó de 78.63 V a 75.13

V, mientras que el estado de carga descendió del 100 % al 74.90 %, con una capacidad extraída de 6.49 Ah. El consumo energético alcanzó 453.93 Wh, equivalente a un consumo específico de 32.23 Wh/km. La energía regenerada aumentó de 12.51 Wh en la Ruta 2 a 17.97 Wh evidenciando que la presencia de tramos descendentes favoreció una mayor recuperación mediante el frenado regenerativo.

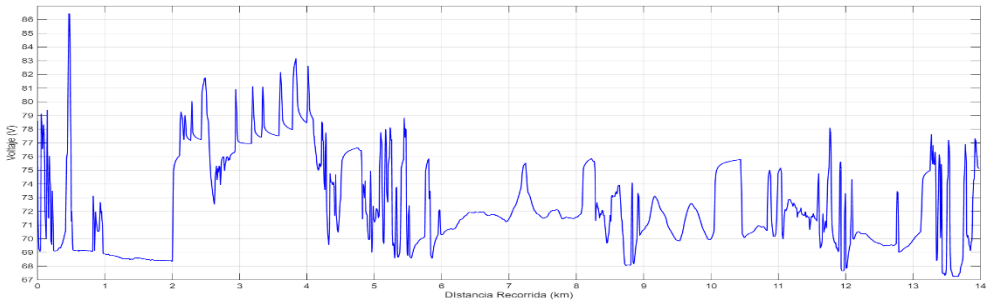


Figura 35. Perfil de voltaje de la Ruta 3

La Figura 35 presenta el comportamiento del voltaje del banco de baterías durante el recorrido de la Ruta 3. Las fluctuaciones del voltaje reflejan la alternancia entre períodos de elevada demanda durante los ascensos y etapas de recuperación parcial de energía en los descensos. En conjunto, la tensión disminuyó de 78.63 V a 75.13 V como consecuencia del consumo energético registrado durante el recorrido.

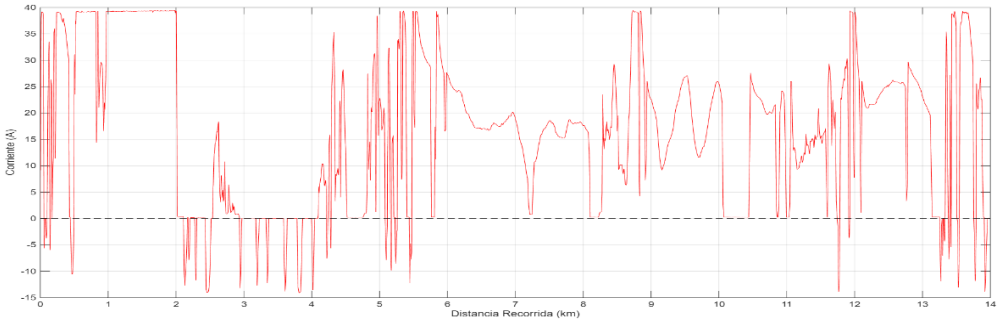


Figura 36. Perfil de corriente de la Ruta 3.

La Figura 36 presenta el comportamiento de la corriente eléctrica durante el recorrido de la Ruta 3. Se observan valores positivos asociados a la demanda de energía del motor durante los tramos de aceleración y ascenso, alcanzando una corriente máxima cercana a 40 A. Asimismo, se registran valores negativos de hasta aproximadamente -14 A durante desaceleraciones y descensos, correspondientes al funcionamiento del sistema de frenado

regenerativo. Este comportamiento confirma que la topografía variable provoca una transición continua entre modos de consumo y regeneración de energía, característica que distingue esta ruta de las evaluadas anteriormente.

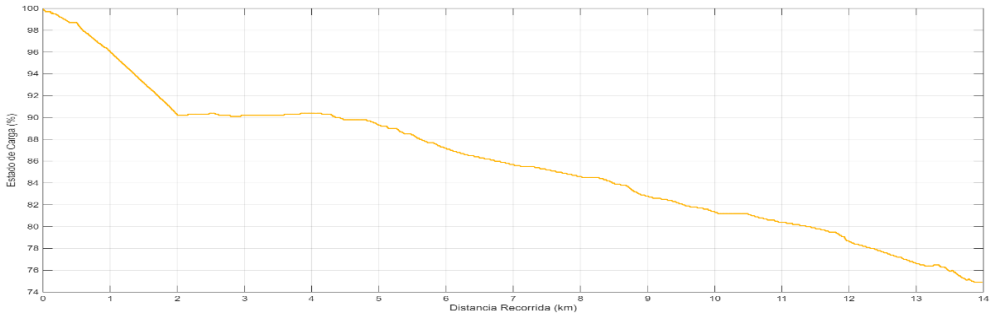


Figura 37. Perfil del estado de carga (SoC) en función de la distancia recorrida de la Ruta 3.

La Figura 37 presenta la evolución del estado de carga (SoC) durante el recorrido de la Ruta 3. Se observa una disminución progresiva desde 100 % hasta el 74,90 %, reflejando el consumo de energía del banco de baterías durante la prueba. La disminución de carga es menos pronunciada que la observada en la Ruta 2, debido a la recuperación parcial de la energía durante los ascensos.

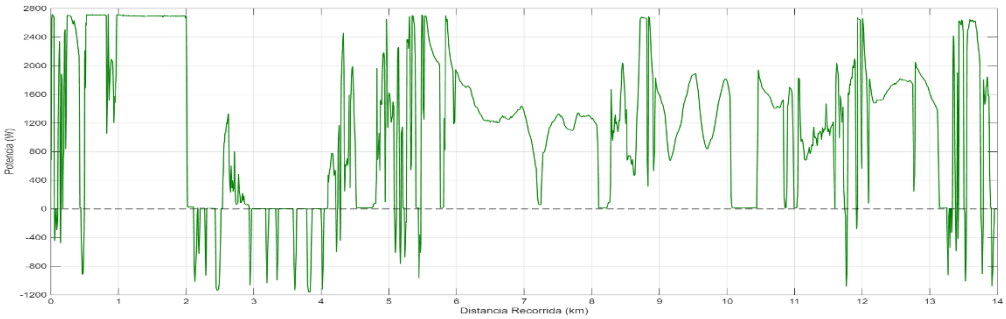


Figura 38. Perfil de la potencia instantánea de la Ruta 3.

La Figura 38 muestra la variación de la potencia eléctrica instantánea durante el recorrido de la Ruta 3. Se observan valores positivos asociados a la demanda energética del motor durante los tramos de aceleración y ascensos, alcanzando una potencia máxima de 2,71 kW. Asimismo, se registran valores negativos durante los descensos y las desaceleraciones, evidenciando la recuperación parcial de energía mediante el sistema de frenado regenerativo. La alternancia

entre potencias positivas y negativas refleja la transición continua entre demanda y recuperación de energía, consecuencia directa de las variaciones topográficas del recorrido.

En conjunto, los resultados obtenidos en la Ruta 3 demuestran que la combinación de ascensos y descensos modifica significativamente el comportamiento energético de la motocicleta eléctrica. La alternancia entre demanda de potencia y recuperación de energía mediante frenado regenerativo permitió reducir el consumo específico respecto a la Ruta 2, evidenciando que la topografía variable favorece una utilización más eficiente de la energía almacenada sin eliminar la influencia de los ascensos sobre la autonomía del vehículo.

4.2.5 Resultados experimentales de la Ruta 4

La Ruta 4 corresponde a la transversal de ciclo transitorio definida en el Capítulo III para evaluar la eficiencia energética de la motocicleta eléctrica bajo condiciones típicas de circulación urbana. A diferencia de las rutas anteriores, este recorrido incorpora frecuentes aceleraciones, desaceleraciones, intersecciones y cambios de dirección, permitiendo analizar la influencia de un ciclo de conducción urbano sobre el consumo energético del vehículo.

Figura 39. Recorrido geográfico de la Ruta 4.

La Figura 39 muestra el recorrido realizado para la Ruta 4, partiendo del origen hacia la zona urbana de Ibarra, encontrando variedad de perfiles de conducción, tránsito, aceleraciones y desaceleraciones frecuentes, para luego llegar al punto de finalización ubicado en la parte alta de Caranqui.

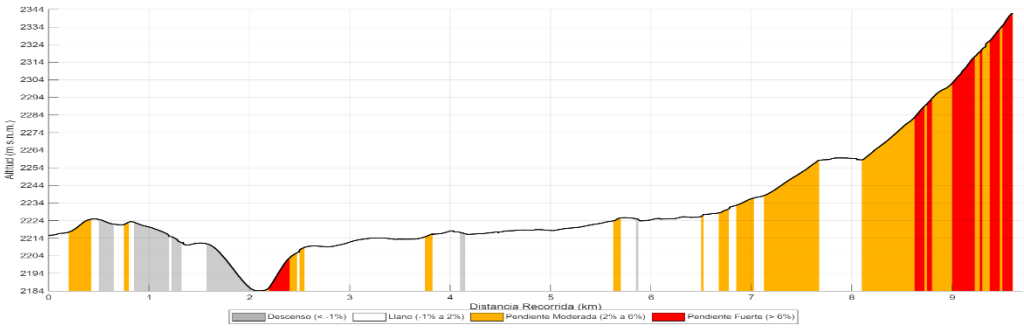


Figura 40. Perfil topográfico de la Ruta 4 con clasificación de la pendiente longitudinal.

La Figura 40 presenta el perfil topográfico de la Ruta 4. El recorrido estuvo conformado en un 44.48 % por tramos planos, acompañado de pendientes moderadas distribuidas a lo largo del trayecto. Estas características, junto con las frecuentes intersecciones y cambios de velocidad, representan adecuadamente un ciclo de conducción urbana para evaluar la eficiencia energética del vehículo.

Tabla 32. Resultados de las variables analizadas en la Ruta 4

Variable	Valor Registrado
Distancia recorrida (km)	9.61
Tiempo de recorrido (min)	31 min 9 s
Velocidad promedio (km/h)	18.26
Velocidad máxima (km/h)	60.80
Altitud mínima (m s.n.m.)	2182
Altitud máxima (m s.n.m.)	2353
Ganancia de elevación (m)	221.80
Pérdida de elevación (m)	84.40
Pendiente promedio positiva (%)	4.01
Pendiente promedio negativa (%)	-2.95
Voltaje inicial (V)	79.42
Voltaje final (V)	69.96
Corriente promedio (A)	11.13

Variable	Valor Registrado
Potencia máxima (kW)	2.77
Estado de carga inicial (%)	100.00
Estado de carga final (%)	77.10
Consumo del estado de carga	22.90
Capacidad extraída (Ah)	6.02
Energía consumida (Wh)	428.31
Energía regenerada (Wh)	19.20
Consumo específico (Wh/km)	42.59

La Tabla 32 resume los principales parámetros obtenidos durante la prueba experimental de la Ruta 4. Los resultados muestran un consumo específico de 42.59 Wh/km, superior al registrado en la Ruta 1 e inferior al de la Ruta 2, evidenciando un comportamiento energético representativo de un entorno urbano con variaciones moderadas de pendiente.

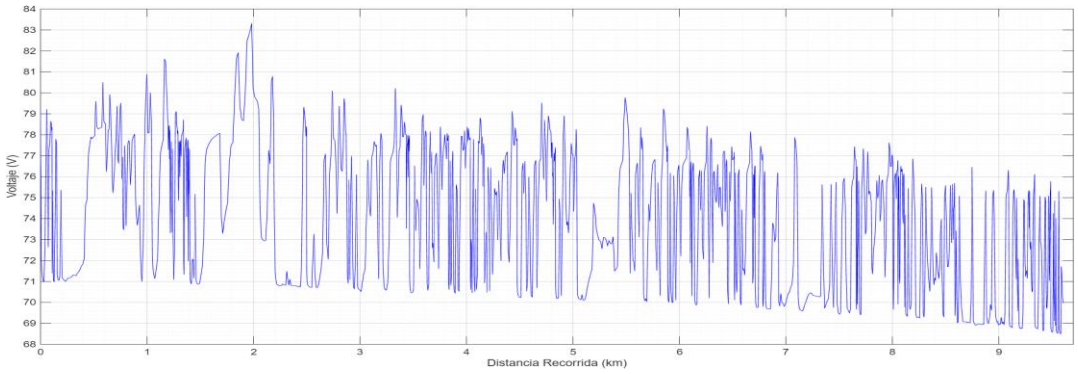


Figura 41. Perfil de voltaje de la Ruta 4.

En la Figura 41 se aprecia el comportamiento del voltaje del banco de baterías durante el recorrido de la Ruta 4. Se observan fluctuaciones de la tensión asociadas a las variaciones en la demanda de corriente del motor y a la recuperación parcial de energía mediante el sistema de frenado regenerativo. A pesar de estas variaciones, la tendencia general del voltaje es descendente, pasando de 79.42 V al inicio del recorrido a 69.96 V al finalizar la prueba. Esta disminución es consecuencia del consumo de energía del banco de baterías, especialmente durante el ascenso del tramo final del recorrido. Este comportamiento refleja la naturaleza

transitoria del recorrido, caracterizada por aceleraciones y desaceleraciones frecuentes propias de la circulación urbana.

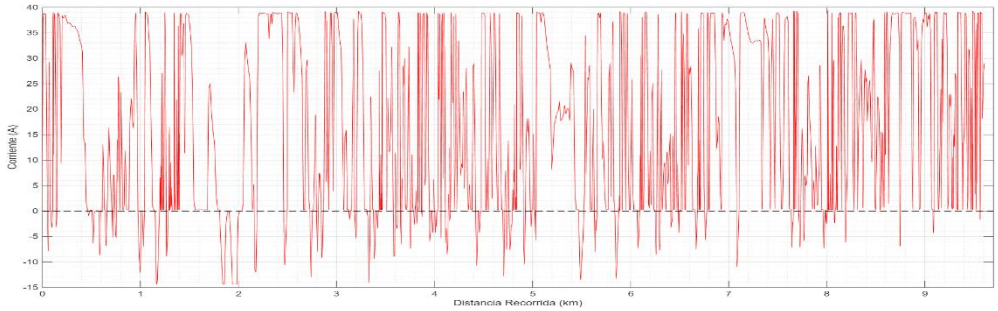


Figura 42. Perfil de corriente de la Ruta 4.

La Figura 42 presenta el comportamiento de la corriente eléctrica durante el recorrido de la Ruta 4. Se observan valores positivos asociados la demanda de energía del motor durante las etapas de aceleración y en los tramos de ascenso, alcanzando una corriente máxima cercana a 39.6 A. Asimismo, se registran valores negativos de hasta aproximadamente -14 A durante desaceleraciones y descensos, correspondientes al funcionamiento del sistema de frenado regenerativo. La alternancia entre corrientes positivas y negativas refleja las variaciones en las condiciones de conducción y el efecto de la topografía sobre la demanda energética del vehículo.

Este comportamiento refleja la naturaleza transitoria del recorrido, caracterizado por aceleraciones y desaceleraciones frecuentes propias de la circulación urbana.

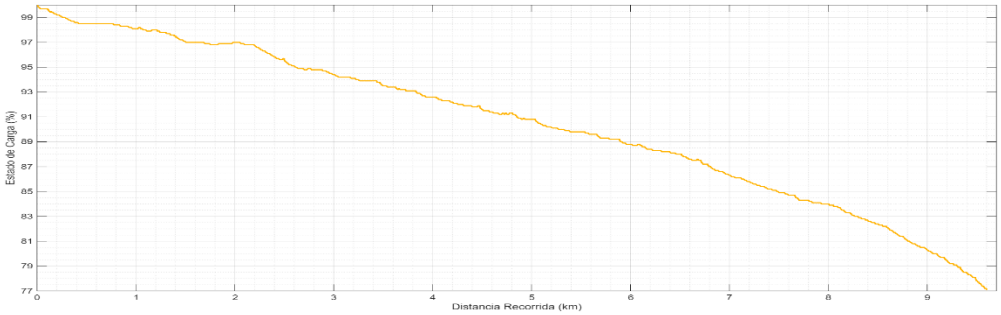


Figura 43. Perfil del estado de carga (SoC) en función de la distancia de la Ruta 4.

La Figura 43 presenta la evolución del estado de carga (SoC) durante el recorrido de la Ruta 4. Se observa una disminución progresiva desde el 100 % hasta el 77.10 %, reflejando el consumo continuo de energía del banco de baterías durante el recorrido. La velocidad de la curva aumenta en el tramo final, coincidiendo con el ascenso sostenido identificado en el perfil

altimétrico, lo que evidencia una mayor tasa de descarga asociada al aumento de la demanda energética del vehículo.

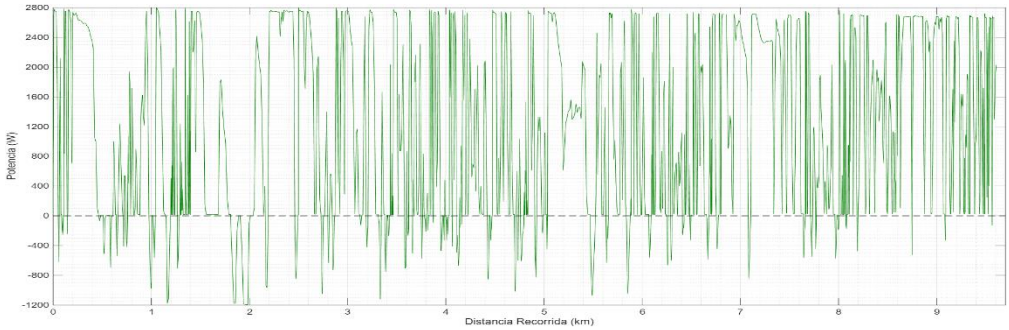


Figura 44. Perfil de la potencia instantánea de la Ruta 4.

La figura 44 muestra la variación de la potencia eléctrica instantánea durante el recorrido de la Ruta 4. Se observan valores positivos asociados a la demanda energética del motor durante las etapas de aceleración y los tramos de ascenso, alcanzando una potencia máxima de 2.77 kW. Asimismo, se registran valores negativos durante desaceleraciones y descensos, evidenciando la recuperación parcial de energía mediante el sistema de frenado regenerativo. La alternancia entre valores positivos y negativos de potencia refleja la influencia de las condiciones de conducción, confirmando que las aceleraciones frecuentes y las variaciones topográficas incrementan la demanda instantánea de potencia durante la circulación urbana.

En conjunto, los resultados obtenidos en la Ruta 4 muestran que las condiciones propias de la circulación urbana, caracterizadas por frecuentes aceleraciones, desaceleraciones y cambios de pendiente, incrementan la variabilidad de la demanda energética del vehículo. En consecuencia, esta ruta representa adecuadamente el comportamiento de la motocicleta eléctrica durante un ciclo de conducción urbano real.

4.2.6 Resultados experimentales de la Ruta 5

La Ruta 5 corresponde al corredor de transición periurbana definido en el Capítulo III para analizar la estabilidad del consumo energético en vías rápidas. Como se observa en la Figura 45, este recorrido combina tramos urbanos y periurbanos con velocidades de circulación más elevadas y variaciones topográficas moderadas, permitiendo evaluar el comportamiento energético de la motocicleta bajo condiciones de conducción más estables.

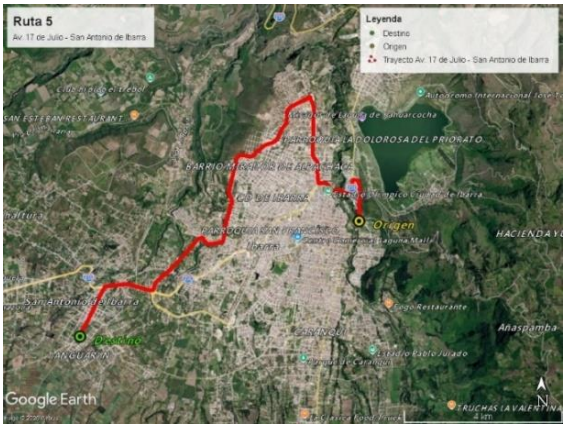


Figura 45. Recorrido geográfico de la Ruta 5.

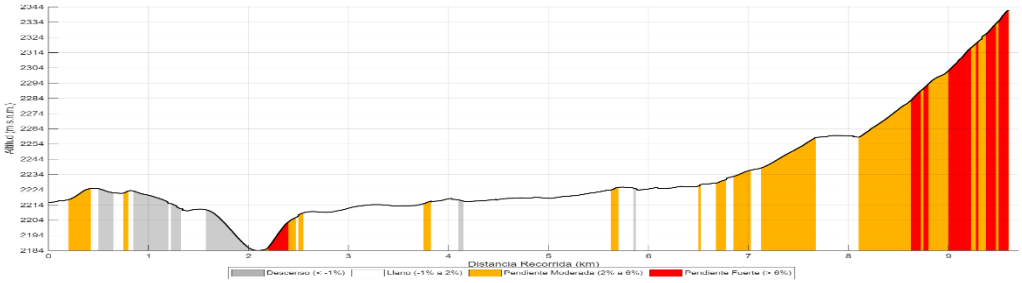


Figura 46. Perfil topográfico de la Ruta 5 con clasificación de la pendiente longitudinal.

La Figura 46 presenta el perfil topográfico de la Ruta 5 con la clasificación de la pendiente longitudinal. Durante los primeros kilómetros predominan ligeras variaciones de elevación, seguidas por un ascenso de mayor magnitud alrededor del kilómetro 5. Posteriormente, el recorrido presenta un descenso prolongado hasta aproximadamente el kilómetro 11, a partir del cual se desarrolla un ascenso continuo que culmina con varios tramos de pendientes superiores al 6 %, representados en color rojo.

Esta combinación de ascensos y descensos, junto con tramos de circulación más continua, permite evaluar la estabilidad del consumo energético bajo condiciones periurbanas.

Tabla 33. Resultados de las variables analizadas en la Ruta 5

Variable	Valor Registrado
Distancia recorrida (km)	14.86
Tiempo de recorrido (min)	27 min 30 s

Variable	Valor Registrado
Velocidad promedio (km/h)	32.18
Velocidad máxima (km/h)	63.30
Altitud mínima (m s.n.m.)	2183
Altitud máxima (m s.n.m.)	2423
Ganancia de elevación (m)	422.28
Pérdida de elevación (m)	219.32
Pendiente promedio positiva (%)	23.10
Pendiente promedio negativa (%)	-3.99
Voltaje inicial (V)	78.23
Voltaje final (V)	72.94
Corriente promedio (A)	18.96
Potencia máxima (kW)	2.72
Estado de carga inicial (%)	100.00
Estado de carga final (%)	65.30
Consumo del estado de carga	34.70
Capacidad extraída (Ah)	8.96
Energía consumida (Wh)	614.10
Energía regenerada (Wh)	21.09
Consumo específico (Wh/km)	40.04

En la Tabla 33 se resumen los datos obtenidos en la Ruta 5, los cuales muestran un consumo específico de 40.04 Wh/km, valor que refleja un comportamiento energético estable pese a las variaciones topográficas presentes durante el recorrido.

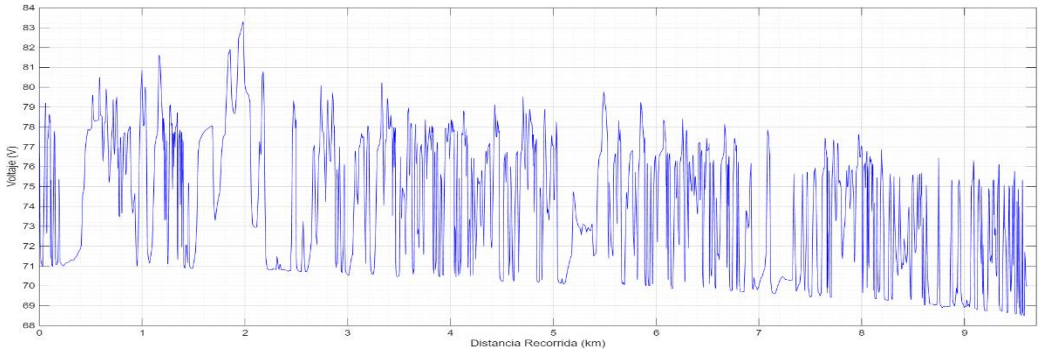


Figura 47. Perfil de voltaje de la Ruta 5.

La Figura 47 presenta el comportamiento del voltaje del banco de baterías durante el recorrido de la Ruta 5. Se observan fluctuaciones de la tensión asociadas a las variaciones en la demanda de corriente del motor y a la recuperación parcial de energía mediante el sistema de frenado regenerativo. A pesar de estas variaciones, la tendencia general del voltaje es descendente, pasando de 78.23 V al inicio del recorrido a 72.94 V al finalizar la prueba. Esta disminución refleja el elevado consumo de energía requerido para afrontar los ascensos presentes a lo largo del recorrido, especialmente durante el ascenso final hacia San Antonio.

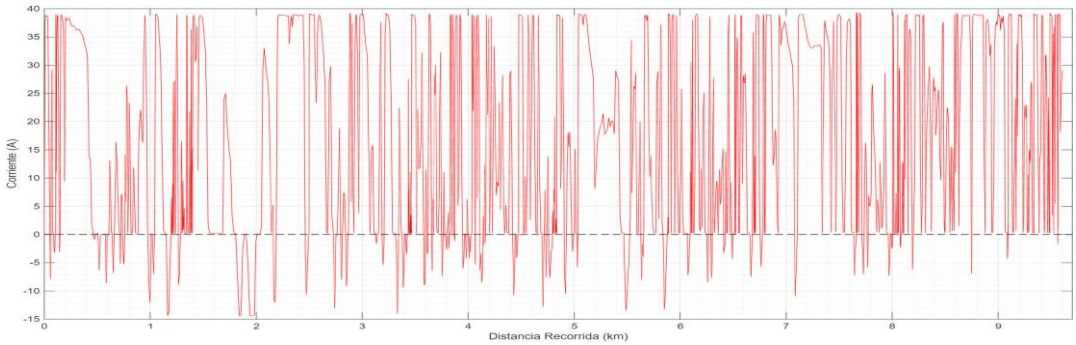


Figura 48. Perfil de corriente de la Ruta 5.

La Figura 48 presenta el comportamiento de la corriente eléctrica durante el recorrido de la Ruta 5. Se observan valores positivos asociados a la demanda de energía del motor durante las etapas de aceleración y los tramos de ascenso, alcanzando una corriente máxima cercana a 39.7 A. Asimismo, se registran valores negativos de hasta aproximadamente -14 A durante desaceleraciones y descensos, correspondientes al funcionamiento del sistema de frenado regenerativo. La variación de la corriente a lo largo del recorrido refleja la influencia combinada

de las condiciones de conducción y de las variaciones topográficas sobre la demanda energética de la motocicleta eléctrica.

Este comportamiento evidencia que la demanda de corriente se mantuvo relativamente estable durante los tramos de circulación continua, incrementándose únicamente en los ascensos más pronunciados.

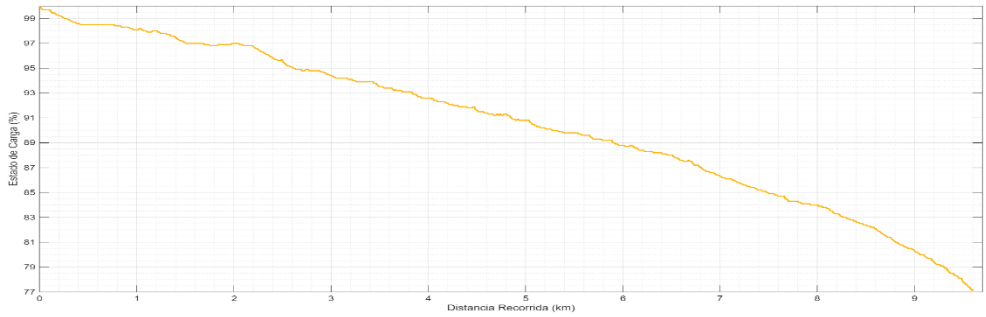


Figura 49. Perfil del estado de carga (SoC) en función de la distancia recorrida de la Ruta 5.

La Figura 49 evidencia que la descarga del banco de baterías no ocurre de manera uniforme a lo largo del recorrido. Durante los primeros kilómetros el estado de carga disminuye de forma gradual; sin embargo, alrededor del kilómetro 5 se observa un incremento en la tasa de descarga, asociado al primer ascenso importante de la ruta. Posteriormente, entre los kilómetros 7 y 10, la pendiente disminuye, lo que indica una menor demanda energética favorecida por el tramo descendente.

Finalmente, el SoC disminuye con mayor rapidez durante el ascenso final hacia San Antonio, alcanzando un valor de 65.30% al término del recorrido.

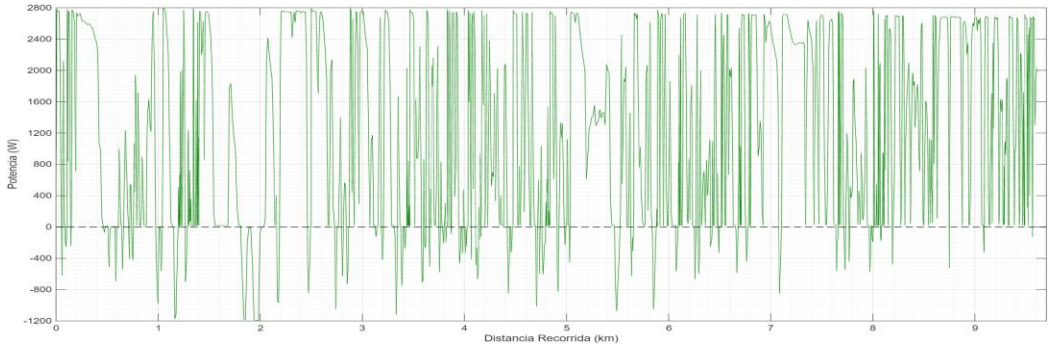


Figura 50. Perfil de la potencia instantánea de la Ruta 5.

La Figura 50 muestra que la demanda de potencia varía de acuerdo con las características topográficas del recorrido. Durante los primeros kilómetros se observan cambios bruscos de potencia asociados a las aceleraciones y desaceleraciones propias de la circulación urbana. Entre los kilómetros 6 y 10 predominan valores de potencia más bajos e incluso negativos, debido al descenso de la ruta y al funcionamiento del sistema de frenado regenerativo. En el tramo final, la potencia aumenta nuevamente y permanece cercana a su valor máximo durante gran parte del ascenso hacia San Antonio de Ibarra, evidenciando el mayor esfuerzo requerido por el sistema de propulsión.

En conjunto, los resultados obtenidos en la Ruta 5 muestran que la combinación de tramos periurbanos y variaciones topográficas moderadas favorece un comportamiento energético relativamente estable. Aunque los ascensos incrementan temporalmente la demanda de potencia y corriente, los tramos de circulación continua permiten mantener un consumo específico inferior al observado en escenarios de mayor exigencia topográfica.

Tabla 34. Resumen comparativo de los resultados obtenidos en las rutas: 1, 2, 3, 4 y 5.

Variable	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4	Ruta 5
Distancia recorrida (km)	9.05	9.32	13.99	9.61	14.86
Tiempo (minutos)	23 min 39 s	21 min 48 s	22 min 41 s	31 min 9 s	27 min 30 s
Velocidad promedio (km/h)	22.60	25.41	36.82	18.26	32.18
Ganancia de elevación (m)	67.14	438.50	266.82	221.80	422.28
Pérdida de elevación	67.77	12.90	238.40	84.40	219.32
Corriente promedio(A)	11.38	22.22	16.56	11.13	18.96
Energía consumida (Wh)	350.76	570.55	453.93	428.31	614.10
Consumo específico (Wh/km)	35.60	60.04	32.23	42.59	40.04
Estado de carga final (%)	82.20	67.70	74.90	77.10	65.30
Consumo del estado de carga (%)	17.80	32.30	25.10	22.90	34.70

En la Tabla 34 se observan los resultados de variables de interés de las cinco rutas asignadas para evaluación de la influencia de la topografía en la autonomía de la motocicleta eléctrica. La Ruta 2 presentó la mayor demanda energética de todos los recorridos, con un

consumo específico de 60.04 Wh/km, un promedio de corriente de 22.22 A y una ganancia de elevación de 438.50 m, lo cual evidencia la influencia de la pendiente en ascenso sobre el consumo de energía. Asimismo, la Ruta 1 fue el recorrido con menor ganancia de elevación y un bajo consumo específico, reflejando las condiciones de circulación menos exigentes en todas las pruebas. En cuanto a la Ruta 5, es el trayecto con mayor consumo del estado de carga, seguido de la Ruta 2, lo cual confirma la influencia de la topografía en el desempeño energético del vehículo.

4.2.7 Resultados experimentales de la Ruta 6

La Figura 51 presenta el recorrido correspondiente a la Ruta 6, utilizada para la prueba de descarga profunda del banco de baterías. El ensayo se desarrolló en un circuito cerrado alrededor de la laguna de Yahuarcocha, este recorrido permite mantener condiciones de operación similares durante las tres pruebas experimentales. Sobre este trayecto se evaluaron los tres niveles de limitación de velocidad disponibles en la motocicleta, con el propósito de analizar su influencia sobre el consumo energético, la descarga del banco de baterías y la autonomía del vehículo.

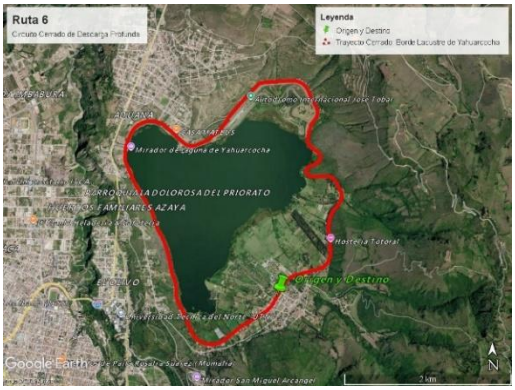


Figura 51. Recorrido geográfico de la Ruta 6

La Figura 52 presenta los perfiles altimétricos correspondientes a las tres pruebas de descarga profunda realizadas en la Ruta 6, empleando los niveles de velocidad 1,2,y 3 de la motocicleta eléctrica. Se observa que las tres pruebas se desarrollaron sobre el mismo circuito alrededor de la laguna de Yahuarcocha, manteniendo un perfil topográfico similar en cada recorrido. La diferencia en la distancia total recorrida se debe al mayor consumo energético

asociado a los niveles de velocidad más altos, lo que redujo la autonomía alcanzada antes de finalizar cada ensayo. De esta manera la comparación entre las pruebas se realiza bajo condiciones topográficas equivalentes, permitiendo analizar la influencia del nivel de velocidad sobre el comportamiento energético del vehículo.

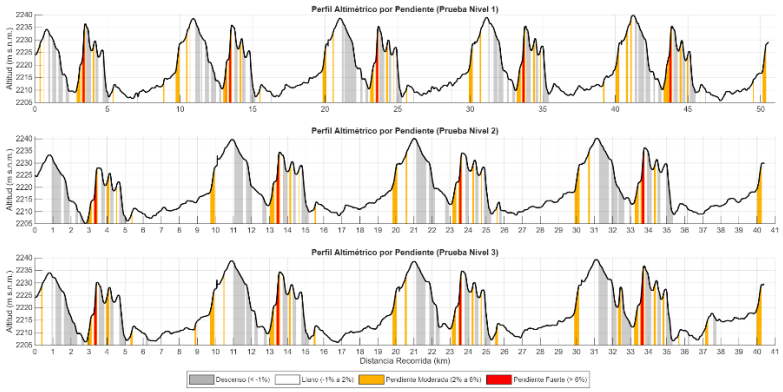


Figura 52. Perfiles altimétricos de las pruebas de descarga profunda correspondiente a los tres niveles de velocidad.

Tabla 35. Resultados de las variables analizadas en la Ruta 6

Variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Distancia recorrida (km)	50.53	40.41	40.39
Tiempo de recorrido (min)	1 h 33 min 49 s	57 min 24 s	58 min 29 s
Velocidad promedio (km/h)	32.16	42.03	41.22
Velocidad máxima (km/h)	50.80	58.00	61.40
Altitud mínima (m s.n.m.)	2206	2205	2206
Altitud máxima (m s.n.m.)	2240	2240	2239
Ganancia de elevación (m)	80.68	79.26	83.60
Pérdida de elevación (m)	120.36	117.32	143.26
Pendiente promedio positiva (%)	1.95	1.87	1.99
Pendiente promedio negativa (%)	-1.90	-1.90	-1.97
Voltaje inicial (V)	78.69	78.60	78.42
Voltaje final (V)	69.22	69.22	68.78
Corriente promedio (A)	9.99	15.89	16.38

Variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Potencia máxima (kW)	2.67	2.70	2.68
Estado de carga inicial (%)	100.00	100.00	100.00
Estado de carga final (%)	37.60	39.20	36.20
Consumo del estado de carga	62.40	60.80	63.80
Capacidad extraída (Ah)	15.73	15.30	16.08
Energía consumida (Wh)	1097.02	1050.17	1095.73
Energía regenerada (Wh)	7.34	6.86	8.56
Consumo específico (Wh/km)	21.59	25.84	26.95

En las pruebas de descarga profunda (Tabla 34), forzar el motor a mayores velocidades penalizó directamente el rendimiento del banco de baterías. Al pasar del nivel 1 al 3, la corriente promedio saltó de 9.99 A a 16.38 A. Como consecuencia de esta exigencia sostenida, el consumo especifico aumentó a 26.95 Wh/km, recortando la distancia máxima de 50.53 km a 40.93 km. Aunque la potencia pico no varió demasiado entre ensayos, la perdida de alcance confirma que mantener una velocidad alta acelera la descarga del sistema.

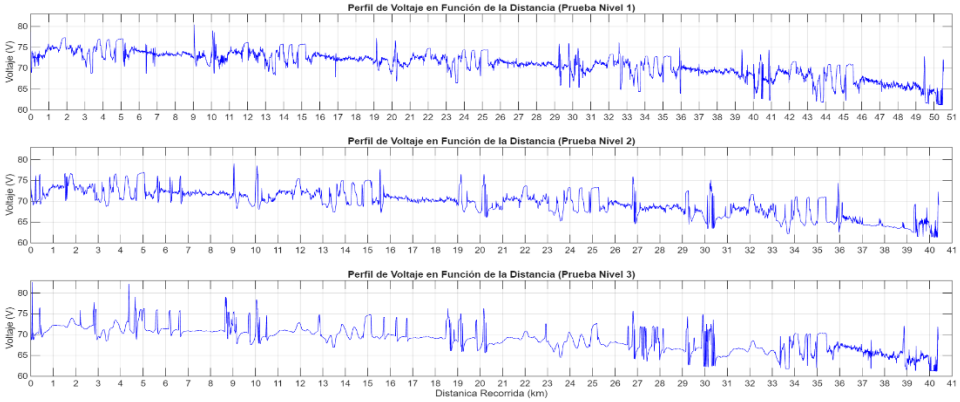


Figura 53. Perfiles de voltaje en función de la distancia durante las pruebas de descarga profunda

La Figura 53 compara la evolución del voltaje del banco de baterías durante las pruebas de descarga profunda realizadas con los tres niveles de velocidad de la motocicleta eléctrica. En los tres ensayos el voltaje disminuye progresivamente conforme aumenta la distancia recorrida. Se observa además que los niveles de velocidad más altos alcanzan el estado final de descarga tras recorrer una menor distancia, evidenciando la reducción de la autonomía.

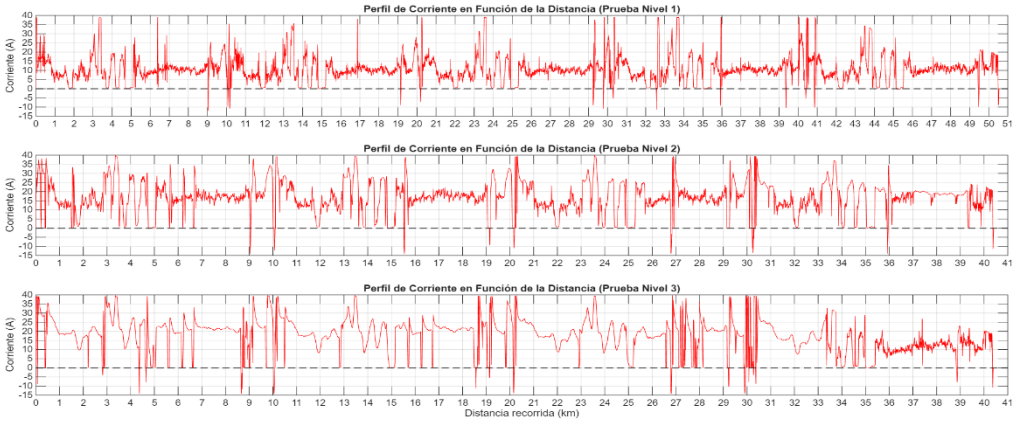


Figura 54. Perfiles de corriente en función de la distancia durante las pruebas de descarga profunda

La Figura 54 compara el comportamiento de la corriente eléctrica durante las pruebas de descarga profunda realizadas con los tres niveles de velocidad de la motocicleta. Los tres ensayos muestran fluctuaciones de corriente que responden directamente a lo que exige el motor en cada instante, con picos negativos que confirman cómo el freno regenerativo logra recuperar fracciones de energía. Sin embargo, al subir el nivel de velocidad, la corriente se estanca en rangos altos por mucho más tiempo; este esfuerzo sostenido del sistema de propulsión es el responsable de acortar la autonomía final de la motocicleta.

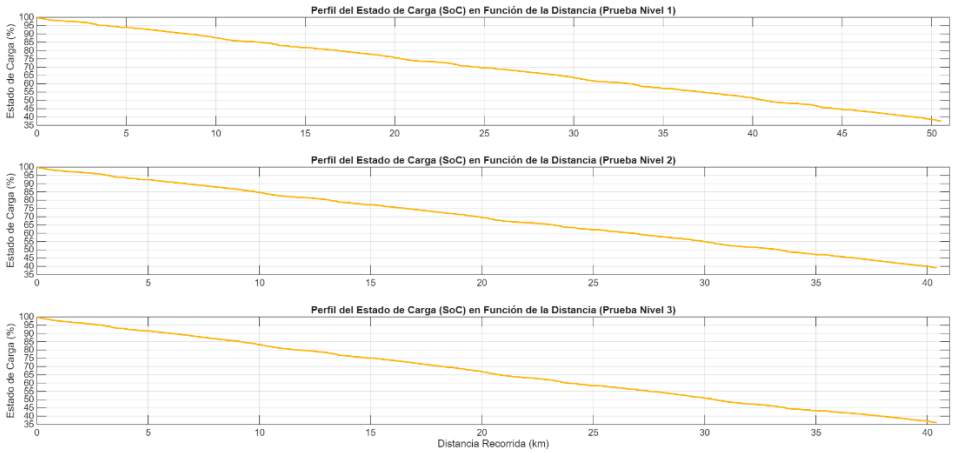


Figura 55. Perfiles del estado de carga en función de la distancia durante las pruebas de descarga profunda.

Al evaluar el desgaste del banco de baterías frente a los kilómetros recorridos (ver Figura 55), el impacto del modo de conducción es evidente. Aunque el estado de carga (SoC) cae continuamente en todos los ensayos de descarga profunda, la distancia útil cambia

drásticamente. El nivel de velocidad 1 entregó el trayecto más largo; en contraste, forzar el motor a los niveles 2 y 3 precipitó la caída de la energía. Esto comprueba que exigir mayor velocidad castiga de forma directa la autonomía total de la motocicleta.

Figura 56. Perfiles de potencia instantánea en función de la distancia durante las pruebas de descarga profunda.

Al analizar las pruebas de descarga profunda en los tres niveles de velocidad (ver Figura 56), se registran variaciones de potencia asociados a los cambios de demanda del sistema de propulsión, alcanzando picos cercanos a 2.7 kW. Asimismo, se observan intervalos con potencia negativa, correspondientes a la recuperación parcial de energía mediante el sistema de frenado regenerativo. Aunque la potencia máxima es similar a los tres niveles de velocidad, el incremento de la velocidad mantiene una mayor demanda energética a lo largo del recorrido, confirmando que el incremento del nivel de velocidad mantiene una mayor demanda durante el recorrido y reduce la autonomía alcanzada.

En conjunto, los resultados obtenidos en la Ruta 6 demuestran que el incremento del nivel de velocidad acelera la descarga del banco de baterías, incrementa el consumo específico y reduce la autonomía de la motocicleta eléctrica. Al realizar las tres pruebas sobre un mismo recorrido y bajo condiciones topográficas equivalentes, las diferencias observadas pueden atribuirse principalmente al efecto del nivel de velocidad sobre el comportamiento energético del vehículo.

4.2.8 Influencia de la carga adicional sobre el comportamiento energético de la motocicleta eléctrica.

Comparación de la Ruta 1

Con el propósito de evaluar la influencia de la carga adicional sobre el comportamiento energético de la motocicleta eléctrica, se realizaron ensayos experimentales con un pasajero utilizando las Rutas 1 y 4, previamente caracterizadas durante las pruebas con un solo conductor. El conductor tuvo una masa de 63.15 kg (incluyendo casco), mientras que el pasajero presentó una masa de 83.70 kg (incluyendo casco), por lo que durante las pruebas el vehículo transportó una masa total de 146.85 kg correspondiente a ambos ocupantes. Las condiciones de operación, el procesamiento experimental y la instrumentación empleada fueron las mismas descritas para las pruebas sin pasajero, con el fin de que las diferencias observadas pudieran atribuirse principalmente al incremento de la carga transportada.

Tabla 36. Tabla comparativa de resultados de la Ruta 1 con pasajero

Parámetro	Solo conductor	Con pasajero	Variación (%)
Distancia (km)	9.05	9.12	+0.8
Energía consumida (Wh)	350.76	424.53	+21.0
Corriente promedio (A)	11.38	13.80	+21.3
Consumo específico (Wh/km)	35.60	44.51	+25.0
SoC consumido (%)	17.80	23.40	+31.5

La Tabla 35 compara los principales parámetros obtenidos en la Ruta 1 durante las pruebas realizadas con un solo conductor y con pasajero. La incorporación de una carga adicional de 83.70 kg incrementó la demanda energética de la motocicleta eléctrica, evidenciada por el aumento de la corriente promedio de 11.38 A a 13.80 A y del consumo específico de energía de 35.60 Wh/km a 44.51 Wh/km. Asimismo, la energía consumida se incrementó de 350.76 Wh a 424.53 Wh, mientras que el consumo se incrementó de 350.76 Wh a 424.53 Wh, mientras que el consumo del estado carga aumentó del 17.80 % al 23.40 %. En contraste, la distancia recorrida permaneció prácticamente constante, lo que indica que las diferencias

observadas se atribuyen principalmente al incremento de la masa transportada y no a variaciones en el recorrido experimental.

Comparación de la Ruta 4

Al revisar los datos capturados en la Ruta 4, el impacto de llevar a un pasajero es evidente. El consumo de corriente registrado subió casi al doble, pasando de 11.13 A a 19.42 A, lo que provocó que la energía total requerida alcanzara los 595.73 Wh. Este esfuerzo adicional también incrementó el consumo específico a 60.81 Wh/km y redujo un 33.20 % el estado de carga (SoC). Dado que la distancia del trayecto fue idéntica en ambos casos, se descartan variaciones de ruta, confirmando que este gasto extra de batería es consecuencia exclusiva de la masa transportada.

Tabla 37. Tabla comparativa de resultados de la Ruta 4 con pasajero

Parámetro	Solo conductor	Con pasajero	Variación (%)
Distancia (km)	9.61	9.60	0.10
Energía consumida (Wh)	428.31	595.73	39.08
Corriente promedio (A)	11.13	19.42	74.08
Consumo específico (Wh/km)	42.59	60.10	41.06
Batería consumida (%)	22.90	33.20	44.98

La comparación de ambas rutas demuestra que el incremento de la masa transportada afecta de manera significativa el comportamiento energético de la motocicleta eléctrica ya que, aunque llevar un pasajero elevó el gasto eléctrico y los picos de corriente en ambos casos, el impacto se disparó drásticamente en la Ruta 4 debido a que los continuos frenados, arranques y cambios de inclinación obligan al motor a multiplicar su esfuerzo para lograr arrastrar el peso extra.

Conclusiones

Los resultados demostraron que la variación topográfica de las rutas afecta al flujo de potencia de la motocicleta eléctrica elevando el consumo energético durante trayectos de ascenso, provocando descargas significativas de las baterías que solo son compensadas parcialmente por la recuperación de energía en los descensos, evidenciando una autonomía altamente dependiente del entorno.

El sistema de adquisición de datos (DAQ) construido especialmente para este trabajo, logró monitorear las magnitudes eléctricas de la motocicleta a la par de las condiciones de entorno y del terreno en tiempo real. Contar con un equipo propio y confiable resultó clave para analizar el desempeño energético del vehículo en un escenario de conducción real.

Los trayectos seleccionados justifican el trabajo de campo al abarcar los diferentes tipos de relieve que existen en el cantón, ya que evaluar el vehículo tanto en vías llanas como en caminos de ascenso permitió observar el verdadero esfuerzo del motor y descarga del banco de baterías, logrando que los datos finales reflejen el comportamiento de la motocicleta tanto en tráfico como en las cuestas de la ciudad.

Recomendaciones

Durante el desarrollo de las pruebas experimentales se observó que la precisión obtenida mediante el receptor GNSS disminuye en entornos urbanos debido a presencia de edificaciones que obstaculizan la señal. Por ello, se recomienda que futuras investigaciones incorporen receptores de mayor precisión o técnicas de corrección, con el propósito de mejorar la calidad de los datos recolectados.

Considerando que en la investigación se empleó un único modelo de motocicleta eléctrica y una sola tecnología de baterías, se recomienda ampliar la metodología a diferentes configuraciones de vehículos y sistemas de almacenamiento de energía. De esta forma se podrá comparar el consumo de otros equipos en las rutas ya evaluadas y comprobar que el sistema de adquisición de datos desarrollado funciona para cualquier escenario.

Para mantener la autonomía y no sobrecargar el sistema de propulsión, se recomienda viajar sin pasajeros o carga adicional al transitar por vías con pendientes pronunciadas, ya que los datos reflejan cómo este esfuerzo en este tipo de topografía compromete la eficiencia del vehículo.

Referencias bibliográficas.

[1] Universidad Europea, "Movilidad eléctrica: ventajas, desafíos y oportunidades", Universidad Europea . Consultado: el 23 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://universidadeuropea.com/blog/movilidad-electrica/

[2] R. Mao *et al.*, "Understanding the Determinants of Electric Vehicle Range: A Multi-Dimensional Survey", *Sustainability 2025, Vol. 17, Page 4259*, vol. 17, núm. 10, p. 4259, may 2025, doi: 10.3390/SU17104259.

[3] E. X. Anrango y J. F. Saguay, "Desarrollo de un ciclo de conducción adaptado a las condiciones de altitud de la ciudad de Quito, Ecuador, para la estimación precisa de la eficiencia energética y la autonomía de vehículos ICEV, EV y FCEV mediante simulaciones computacionales", masterThesis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2025. Consultado: el 22 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26292

[4] A. L. Guachichulca Mariño y C. A. Zhunio Ortega, "Análisis y proyección de autonomía para distintas trayectorias de la moto eléctrica venus 2.0 de la universidad politécnica salesiana", Tesis de Grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2023. Consultado: el 27 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26603

[5] J. Rosas y Á. Trujillo, "Análisis de autonomía de batería y ciclos de conducción en un vehículo eléctrico urbano, en ciudades de altura.", Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2022. Consultado: el 23 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12431

[6] P. Quintana Villacis *et al.*, "Estudio de Análisis y Prospectiva de la Electromovilidad en Ecuador y el Mix Energético al 2030", sep. 2023. Consultado: el 23 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/373688873_Estudio_de_Analisis_y_Perspectiva_de_la_Electromovilidad_en_Ecuador_y_el_Mix_Energetico_al_2030

[7] I. Vascan y L. Szabó, "A Brief History of Electric Vehicles", *Computer Science and Control Systems*, vol. 15, may 2022, Consultado: el 25 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/363520342_A_Brief_History_of_Electric_Vehicles

[8] A. Torres y A. Mera, "Ecuador adopta la movilidad sostenible: tipos, beneficios y lo que debes saber sobre vehículos eléctricos", *Panorama Eléctrico 2024*, núm. 24, pp. 25–36, sep. 2024.

[9] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, "Boletín de Ventas de Vehículos", oct. 2025. Consultado: el 23 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2025/10/Boletin-de-Prensa-Septiembre-2025-1.pdf

[10] I. Kusuma, Ruliyanta, R. A. S. Kusumoputro, y A. Iswadi, "Electric Vehicle Review: BEV, PHEV, HEV, or FCEV?", *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 10, pp. 70–83, ene. 2025, doi: 10.21009/jkem.10.1.8.

[11] C. A. Pacheco Rodríguez, "Análisis de Autonomía de Vehículos Eléctricos en Función del Ciclo de Conducción", Tesis, Universidad Internacional del Ecuador, Guayaquil, 2022. Consultado: el 27 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/5155

[12] IEA, "Global EV Outlook 2025", Paris, may 2025. Consultado: el 27 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025

[13] G. Carranza, M. Do Nascimiento, J. Fanals, J. Febrer, y C. Valderrama, "Life cycle assessment and economic analysis of the electric motorcycle in the city of Barcelona and the impact on air pollution", *Science of the Total Environment*, vol. 821, may 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153419.

[14] L. Reinoso y J. Ortega, "Incremento de la autonomía de un vehículo eléctrico Dayang CHOK-S mediante paneles solares", *NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE*

CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA, vol. 3, núm. 2, pp. 40–46, dic. 2020, doi: 10.37135/ns.01.06.03.

[15] A. C. Jaimes, "¿Cuántos kilómetros puede recorrer una moto eléctrica? Le contamos su tiempo de carga", Caracol Radio. Consultado: el 29 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://caracol.com.co/2024/05/19/cuantos-kilometros-puede-recorrer-una-moto-electrica-le-contamos-su-tiempo-de-carga/

[16] Movcan, "High Altitude Performance: How Elevation Affects Your E-Bike", Movcan. Consultado: el 15 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://movcan-bike.com/blogs/blog/high-altitude-performance-how-elevation-affects-your-e-bike

[17] moeve, "Autonomía de las motos eléctricas: cuántos kilómetros puedes recorrer realmente", CEPSA. Consultado: el 30 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.moeve.es/es/blog/autonomia-motos-electricas

[18] UNECE, "AGREEMENT CONCERNING THE ESTABLISHING OF GLOBAL TECHNICAL REGULATIONS FOR WHEELED VEHICLES, EQUIPMENT AND PARTS WHICH CAN BE FITTED AND/OR BE USED ON WHEELED VEHICLES ", United Nations. Consultado: el 30 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29registry/ECE-TRANS-180a2e.pdf

[19] A. Gomstyn y A. Jonker, "¿Qué es el almacenamiento de energía? ", IBM. Consultado: el 24 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ibm.com/think/topics/energy-storage#3

[20] D. Torres, "Así funcionan las baterías de los autos eléctricos", Motorysa. Consultado: el 24 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://bydauto.com.co/blog/bateria-de-los-autos-electricos/

[21] I. Ramdoo, "A BRIEF GUIDE TO BATTERIES ", The International Institute for Sustainable Development . Consultado: el 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.iisd.org/system/files/2023-09/brief-guide-to-batteries.pdf

[22] A. Kampker, H. H. Heimes, C. Offermanns, J. Vienenkötter, y T. Robben, "Framework and Classification of Battery System Architectures", *World Electric Vehicle Journal* , vol. 14, núm. 4, p. 88, mar. 2023, doi: 10.3390/WEVJ14040088.

[23] V. Quintero, O. Che, E. Ching2, O. Auciello, y E. De Obaldía, "Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, núm. 1, ene. 2021, Consultado: el 26 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/339/3392002003/index.html

[24] Keheng, "Pros and Cons of Motorcycle Battery Types: LFP vs NMC vs LTO vs Lead-Acid vs NiMH", Keheng. Consultado: el 29 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://keheng-battery.com/pros-and-cons-of-motorcycle-battery-types-lfp-vs-nmc-vs-lto-vs-lead-acid-vs-nimh/

[25] C. Wu, "¿Qué es una batería de grafeno? ventajas, inconvenientes y usos ", TYCORUN. Consultado: el 29 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://batteryswapstation.com/es/what-is-a-graphene-battery/

[26] Battery University, " How does the Lead Acid Battery Work?", Battery University. Consultado: el 2 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work/

[27] S. Gill y M. Dhankhar, "Sodium ion (Na+) batteries – a comprehensive review ", *Materials NanoScience*, vol. 11, núm. 1, p. 951, feb. 2024, doi: https://doi.org/10.62110/sciencein.jmns.2024.V11.951.

[28] R. Shah, M. Roshan, y V. Mittal, "Sodium Batteries for Use in Grid-Storage Systems and Electric Vehicles ", AltEnergyMag. Consultado: el 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.altenergymag.com/article/2025/01/Sodium-Batteries-for-use-in-Grid-Storage-Systems-and-Electric-Vehicles/44327?utm_source

[29] C. Morente Fernández, "ANÁLISIS Y MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DE BATERÍAS PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS", Universidad Carlos III de Madrid ,

Leganés, 2015. Consultado: el 25 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://hdl.handle.net/10016/23050

[30] Dln. Energy, "¿Cómo Interpretar las Curvas de Descarga de la Batería? ", Dln. Energy. Consultado: el 2 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://bateria18650.com/como-interpretar-las-curvas-de-descarga-de-la-bateria/

[31] "¿Qué es y para qué sirve el sistema de gestión de baterías BMS?" Consultado: el 29 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.cambioenergetico.com/blog/sistema-gestion-bateria-bms/#Que_es_un_sistema_de_gestion_de_baterias_BMS

[32] MathWorks, "Introducción a los sistemas de gestión de baterías (BMS) ", MATLAB. Consultado: el 29 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://la.mathworks.com/discovery/battery-management-system.html

[33] G. García, "Todo lo que necesitas saber sobre los motores eléctricos que emplean los coches: tipos, ventajas y cifras clave", Híbridos y eléctricos . Consultado: el 25 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.hibridosyelectricos.com/coches/todo-necesitas-saber-sobre-motores-electricos-emplean-coches-tipos-ventajas-cifras-clave_81706_102.html

[34] Asociación Gremial de Vehículos Eléctricos de Chile, "Motores eléctricos vs a combustión ¿Quién gana? Nuevo informe de Amech compara los puntos más importantes ", MOBILITY Portal Latinoamérica. Consultado: el 25 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://mobilityportal.lat/motores-electricos-vs-a-combustion-quien-gana-nuevo-informe-de-amech-compara-los-puntos-mas-importantes/

[35] Y. Tao *et al.*, "Fault Diagnosis of In-Wheel Motors Used in Electric Vehicles: State of the Art, Challenges, and Future Directions", *Machines*, vol. 13, núm. 8, ago. 2025, doi: 10.3390/machines13080711.

[36] C. Contò y N. Bianchi, "E-Bike Motor Drive: A Review of Configurations and Capabilities", *Energies (Basel).*, vol. 16, núm. 1, ene. 2023, doi: 10.3390/en16010160.

[37] R. Islam, S. M. S. H. Rafin, y O. A. Mohammed, “Comprehensive Review of Power Electronic Converters in Electric Vehicle Applications”, el 1 de marzo de 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/forecast5010002.

[38] W. A. Bazante Bazante, “Proceso de implementación de la electromovilidad para una flota pequeña de vehículos M1 en Guayaquil”, Universidad Internacional del Ecuador, Guayaquil, 2020. Consultado: el 20 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/4390

[39] D. Bhavsar, R. K. Jaychandra, y M. Mittal, “Data Acquisition and Performance Analysis during Real-Time Driving of a Two-Wheeler Electric Vehicle—A Case Study”, *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, núm. 3, mar. 2024, doi: 10.3390/wevj15030121.

[40] C. Moreno, A. González, J. L. Olazagoitia, y J. Vinolas, “The acquisition rate and soundness of a low-cost data acquisition system (LC-DAQ) for high frequency applications”, *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, núm. 2, ene. 2020, doi: 10.3390/s20020524.

[41] GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO MUNICIPAL DEL CANTÓN SAN MIGUEL DE IBARRA, “ORDENANZA REFORMATORIA DE LA ORDENANZA DE ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y ELABORACIÓN DEL PLAN DE USO Y GESTIÓN DE SUELO, QUE ACTUALIZA EL COMPONENTE URBANÍSTICO DEL PLAN DE USO Y GESTIÓN DE SUELO PARA EL PERIODO 2023 - 2027”, Quito, sep. 2025.

[42] QS Motor, “QS212 10inch 1200W E-Scooter In-Wheel Motor”, QS Motor. Consultado: el 22 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: http://www.qs-motor.com/product/qs212-10inch-1200w-35h-e-scooter-in-wheel-hub-motor/

[43] Espressif Systems, “ESP32-WROOM-32D & ESP32 WROOM-32U Datasheet”, 2019. [En línea]. Disponible en: www.espressif.com/en/subscribe.

[44] Allegro MicroSystems, “ACS758xCB, Thermally Enhanced, Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 100 μΩ Current Conductor”, mar. 2025. [En línea]. Disponible en: www.allegromicro.com

[45] u-blox, “NEO-M8, u-blox M8 concurrent GNSS modules, Datasheet”, sep. 2025. [En línea]. Disponible en: www.u-blox.com

[46] InvenSense Inc., “MPU-9250 Product Specification”, jun. 2016.

[47] L. Aosong(Guangzhou) Electronics Co., “Digital-output relative humidity & temperature sensor/module AM2303”.

[48] Inc. Maxim Integrated Products, “DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer”, 2019. [En línea]. Disponible en: www.maximintegrated.com

[49] Bosch Sensortec GmbH, “BMP280 Digital Pressure Sensor -Data Sheet”, 2021. [En línea]. Disponible en: www.bosch-sensortec.com

[50] Texas Instruments, “ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I 2 C-Compatible, 860SPS, 16-Bit ADCs with Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator”, oct. 2024. [En línea]. Disponible en: www.ti.com

[51] Solomon Systech Limited, “TECHNICAL DATA - SSD1306 128 x 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller”, 2008. [En línea]. Disponible en: http://www.solomon-systech.com

[52] Naylamp Mechatronics, “Módulo lector de memoria Micro SD Card - SPI”, Naylamp Mechatronics. Consultado: el 27 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://naylampmechatronics.com/almacenamiento/104-modulo-lector-de-memoria-micro-sd-card-lvc125a.html

[53] XLSEMI, “Datasheet 5A 180KHz 36V Buck DC to DC Converter XL4015”. [En línea]. Disponible en: www.xlsemi.com

ANEXOS

Anexo A. Ficha técnica comercial de la motocicleta Torino Racer.

Anexo B. Ficha técnica de referencia del motor QS de 1200 W

Motor Specification:

1. **Motor Type: BLDC Hub Motor with Permanent Magnets**
2. **Motor design: Double axle out with 10inch rim**
3. **Rim size and material:2.15-10 Iron rim**
4. **Matching Tire: 3.0-10, 3.5-10**
5. **Magnet Height: 35MM**
6. **Pole Pairs: 23 pairs**
7. **Rated Power: 1200W**
8. **Max Power: 2000W**
9. **Rated Voltage: 48V(60V/72V Can be optional)**
10. **Speed: 45km/h (30-50km/h can be customized)**
11. **Max No-load RPM: 620-650RPM**
12. **Max Torque: 98N.M**
13. **Max Efficiency: 89-90%**
14. **Rated current:23A**
15. **Max current:40A**
16. **Brake type: Disc brake or Drum brake(Optional)**
17. **Rear Fork width for installation: 200mm**
18. **Cross Section of Phase wire: 3 mm2**
19. **Axle thread:M12**
20. **Hall sensor phasing angle: 120 degree**
21. **Type of Sensor: Hall Sensor(3pcs)**
22. **Working Temperature: 70 degree, Peak 120 degree**
23. **Cooling method:Air cooling**
24. **Waterproof Grade: IP67**
25. **W./ G..W. : 11kgs / 12kgs**

Anexo C. Ficha técnica batería TNE 12-25 (12V25Ah)

TNE 12-25 [12V25Ah]

TIANNENG

Product Features

Deep Cycle Series	400~600 Cycle Times @100%DOD	
↑10% Energy Density Patent negative pasting formula	↓50% Grid Corrosion Rare-earth patent alloy	0% Acid stratification Nano silica gel technology

Product Applications

Moped | Electric Two-wheeler | Electric Motorcycle | E-scooter | Kid's Electric Bike

Physical Specifications

Model	Dimensions (mm/inch)				Weight(kg/lbs) ±3%	Terminal	Container
	Length	Width	Height	Total Height			
TNE12-25	180/7.09	77/3.03	171/6.73	171/6.73	6.05/13.3	I10	ABS UL94-HB (Optional: FR ABS UL94-V0)

Product Specifications

Nominal Voltage	Rated Capacity25℃/77℃	Opreating Temp.Range	Capacity Effected Temp	Capacity vs Storge Time (25℃/77℉)
12V	25Ah 20hr Rate (1.80V/cell) 22.0Ah 10hr Rate (1.75V/cell) 21.5Ah 5hr Rate (1.75V/cell) 20.0Ah 2hr Rate (1.75V/cell)	Discharge:-15℃~50℃ (5℉~122℉) Charge:0℃~40℃ (32℉~104℉) Storage:-15℃~40℃ (5℉~104℉) Optimum:25℃±2℃ (77℉±5℉)	40℃ (104℉):106% 25℃ (77℉):100% 0℃ (32℉):85% -15℃ (5℉):72%	Three months : 90% Six months : 80%

Constant Current Discharge (A)@25℃ (77℉)

F.V/Time	30min	45min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h
1.85V/cell	26.7	19.1	15.1	8.65	6.06	4.68	3.89	3.31	2.58	2.10	1.15
1.80V/cell	27.6	19.6	15.6	8.94	6.19	4.83	4.04	3.44	2.65	2.16	1.25
1.75V/cell	28.5	20.4	16.2	10.0	6.73	5.06	4.29	3.61	2.73	2.20	1.21
1.70V/cell	29.2	20.9	16.7	10.1	6.80	5.18	4.33	3.68	2.79	2.26	1.24
1.67V/cell	29.8	21.6	17.3	10.2	6.90	5.31	4.46	3.76	2.86	2.30	1.25
1.60V/cell	30.6	22.2	17.6	10.5	7.14	5.46	4.52	3.85	2.93	2.37	1.26

Constant Power Discharge (W/cell)@25℃ (77℉)

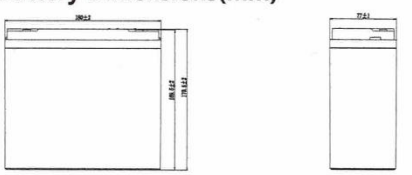
F.V/Time	30min	45min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h
1.85V/cell	52.2	37.6	29.9	17.2	12.1	9.43	7.84	6.69	5.23	4.27	2.34
1.80V/cell	53.8	38.4	30.7	17.8	12.4	9.69	8.12	6.92	5.35	4.36	2.53
1.75V/cell	55.1	39.9	31.8	19.8	13.4	10.1	8.59	7.23	5.48	4.43	2.44
1.70V/cell	56.2	40.6	32.6	19.8	13.5	10.3	8.62	7.33	5.59	4.52	2.49
1.67V/cell	57.0	41.6	33.6	19.9	13.6	10.5	8.82	7.44	5.66	4.57	2.49
1.60V/cell	58.0	42.4	33.9	20.4	13.9	10.7	8.86	7.56	5.77	4.68	2.51

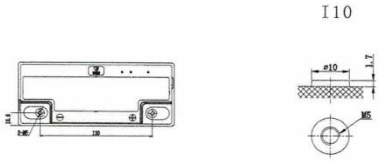
The documents is subject to change without prior notification.
©2019 All rights reserved by Tianneng Group.Trademarks and logos are the property of Tianneng Group and its affiliates. (V1.1)

TNE 12-25 [12V25Ah]

TIANNENG

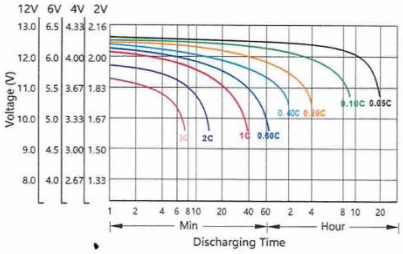
Battery Dimensions(mm)



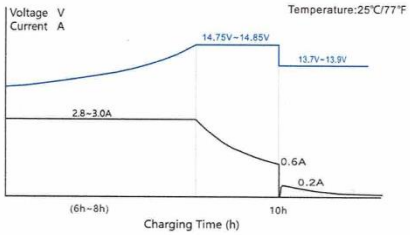


Electrical Characteristics

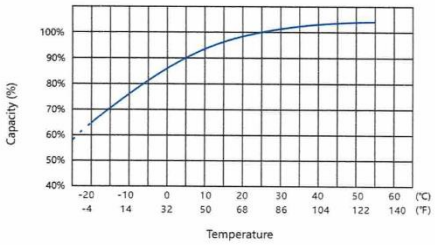
Discharging Characteristics@25℃(77℉)



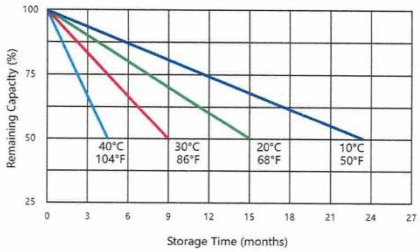
Charging Characteristics@25℃(77℉)



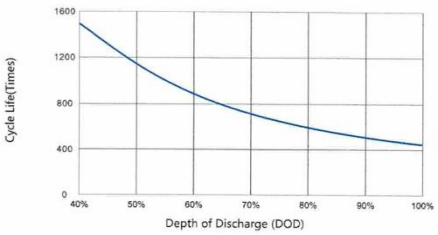
Capacity vs Temperature



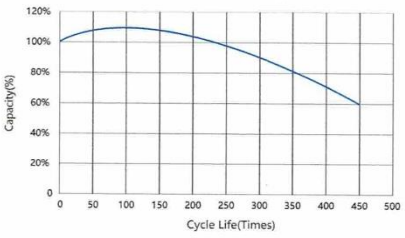
Self-discharge vs Time



Cycle Life vs Depth of Discharge@25℃(77℉)



Cycle Life vs Remaining Capacity@25℃(77℉)



Usage and Maintenance

Limited Current	Limited Voltage	Floating Voltage
Limited current: ≤0.15C₅A	14.6V~14.8V@25℃(77℉) Temp.Coefficient:-24mV/℃	13.6V~14.6V@25℃(77℉) Temp.Coefficient:-18mV/℃

The data/contents is subject to change without prior notification.
©2018 All rights reserved by Tianneng Group Trademarks and logos are the property of Tianneng Group and its affiliates. (V7.1)

Anexo D. Fichas técnicas de sensores usados en la investigación

2. Pin Definitions

2.1 Pin Layout

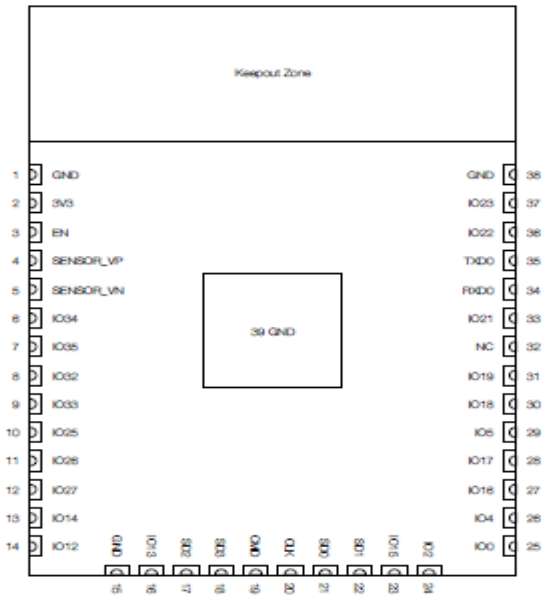


Figure 1: ESP32-WROOM-32D Pin Layout (Top View)

Note:
The pin layout of ESP32-WROOM-32U is the same as that of ESP32-WROOM-32D, except that ESP32-WROOM-32U has no keepout zone.

2.2 Pin Description

The ESP32-WROOM-32D and ESP32-WROOM-32U have 38 pins. See pin definitions in Table 3.

Table 3: Pin Definitions

Name	No.	Type	Function
GND	1	P	Ground
3V3	2	P	Power supply
EN	3	I	Module-enable signal. Active high.
SENSOR_VP	4	I	GPIO36, ADC1_CH0, RTC_GPIO0
SENSOR_VN	5	I	GPIO39, ADC1_CH3, RTC_GPIO3
IO34	6	I	GPIO34, ADC1_CH6, RTC_GPIO4
IO35	7	I	GPIO35, ADC1_CH7, RTC_GPIO5

Name	No.	Type	Function
IO32	8	I/O	GPIO32, XTAL_32K_P (32.768 kHz crystal oscillator input), ADC1_CH4, TOUCH9, RTC_GPIO9
IO33	9	I/O	GPIO33, XTAL_32K_N (32.768 kHz crystal oscillator output), ADC1_CH5, TOUCH8, RTC_GPIO8
IO25	10	I/O	GPIO25, DAC_1, ADC2_CH8, RTC_GPIO6, EMAC_RXD0
IO26	11	I/O	GPIO26, DAC_2, ADC2_CH9, RTC_GPIO7, EMAC_RXD1
IO27	12	I/O	GPIO27, ADC2_CH7, TOUCH7, RTC_GPIO17, EMAC_RX_DV
IO14	13	I/O	GPIO14, ADC2_CH6, TOUCH6, RTC_GPIO16, MTMS, HSPICLK, HS2_CLK, SD_CLK, EMAC_TXD2
IO12	14	I/O	GPIO12, ADC2_CH5, TOUCH5, RTC_GPIO15, MTDI, HSPIQ, HS2_DATA2, SD_DATA2, EMAC_TXD3
GND	15	P	Ground
IO13	16	I/O	GPIO13, ADC2_CH4, TOUCH4, RTC_GPIO14, MTCK, HSPID, HS2_DATA3, SD_DATA3, EMAC_RX_ER
SHD/SD2*	17	I/O	GPIO9, SD_DATA2, SPIHD, HS1_DATA2, U1RXD
SWP/SD3*	18	I/O	GPIO10, SD_DATA3, SPIWP, HS1_DATA3, U1TXD
SCS/CMD*	19	I/O	GPIO11, SD_CMD, SPICS0, HS1_CMD, U1RTS
SCK/CLK*	20	I/O	GPIO6, SD_CLK, SPICLK, HS1_CLK, U1CTS
SDO/SD0*	21	I/O	GPIO7, SD_DATA0, SPIQ, HS1_DATA0, U2RTS
SDI/SD1*	22	I/O	GPIO8, SD_DATA1, SPID, HS1_DATA1, U2CTS
IO15	23	I/O	GPIO15, ADC2_CH3, TOUCH3, MTDO, HSPICS0, RTC_GPIO13, HS2_CMD, SD_CMD, EMAC_RXD3
IO2	24	I/O	GPIO2, ADC2_CH2, TOUCH2, RTC_GPIO12, HSPIWP, HS2_DATA0, SD_DATA0
IO0	25	I/O	GPIO0, ADC2_CH1, TOUCH1, RTC_GPIO11, CLK_OUT1, EMAC_TX_CLK
IO4	26	I/O	GPIO4, ADC2_CH0, TOUCH0, RTC_GPIO10, HSPIHD, HS2_DATA1, SD_DATA1, EMAC_TX_ER
IO16	27	I/O	GPIO16, HS1_DATA4, U2RXD, EMAC_CLK_OUT
IO17	28	I/O	GPIO17, HS1_DATA5, U2TXD, EMAC_CLK_OUT_180
IO5	29	I/O	GPIO5, VSPICS0, HS1_DATA6, EMAC_RX_CLK
IO18	30	I/O	GPIO18, VSPICLK, HS1_DATA7
IO19	31	I/O	GPIO19, VSPIQ, U0CTS, EMAC_TXD0
NC	32	-	-
IO21	33	I/O	GPIO21, VSPIHD, EMAC_TX_EN
RXD0	34	I/O	GPIO3, U0RXD, CLK_OUT2
TXD0	35	I/O	GPIO1, U0TXD, CLK_OUT3, EMAC_RXD2
IO22	36	I/O	GPIO22, VSPIWP, U0RTS, EMAC_TXD1
IO23	37	I/O	GPIO23, VSPID, HS1_STROBE
GND	38	P	Ground

Notice:

* Pins SCK/CLK, SDO/SD0, SDI/SD1, SHD/SD2, SWP/SD3 and SCS/CMD, namely, GPIO6 to GPIO11 are connected to the integrated SPI flash integrated on the module and are not recommended for other uses.

2.3 Strapping Pins

ESP32 has five strapping pins, which can be seen in Chapter 6 Schematics:

- MTDI
- GPIO0
- GPIO2
- MTDO
- GPIO5

Software can read the values of these five bits from register "GPIO_STRAPPING".

During the chip's system reset release (power-on-reset, RTC watchdog reset and brownout reset), the latches of the strapping pins sample the voltage level as strapping bits of "0" or "1", and hold these bits until the chip is powered down or shut down. The strapping bits configure the device's boot mode, the operating voltage of VDD_SDIO and other initial system settings.

Each strapping pin is connected to its internal pull-up/pull-down during the chip reset. Consequently, if a strapping pin is unconnected or the connected external circuit is high-impedance, the internal weak pull-up/pull-down will determine the default input level of the strapping pins.

To change the strapping bit values, users can apply the external pull-down/pull-up resistances, or use the host MCU's GPIOs to control the voltage level of these pins when powering on ESP32.

After reset release, the strapping pins work as normal-function pins.

Refer to Table 4 for a detailed boot-mode configuration by strapping pins.

Table 4: Strapping Pins

Voltage of Internal LDO (VDD_SDIO)			
Pin	Default	3.3 V	1.8 V
MTDI	Pull-down	0	1
Booting Mode			
Pin	Default	SPI Boot	Download Boot
GPIO0	Pull-up	1	0
GPIO2	Pull-down	Don't-care	0
Enabling/Disabling Debugging Log Print over U0TXD During Booting			
Pin	Default	U0TXD Active	U0TXD Silent
MTDO	Pull-up	1	0

Timing of SDIO Slave					
Pin	Default	Falling-edge Sampling Falling-edge Output	Falling-edge Sampling Rising-edge Output	Rising-edge Sampling Falling-edge Output	Rising-edge Sampling Rising-edge Output
MTDO	Pull-up	0	0	1	1
GPIO5	Pull-up	0	1	0	1

Note:

- Firmware can configure register bits to change the settings of "Voltage of Internal LDO (VDD_SDIO)" and "Timing of SDIO Slave" after booting.
- Both ESP32-WROOM-32D and ESP32-WROOM-32U integrate a 3.3 V SPI flash, so the pin MTDI cannot be set to 1 when the modules are powered up.

3. Functional Description

This chapter describes the modules and functions integrated in ESP32-WROOM-32D and ESP32-WROOM-32U.

3.1 CPU and Internal Memory

ESP32-D0WD contains a dual-core Xtensa® 32-bit LX6 MCU. The internal memory includes:

- 448 KB of ROM for booting and core functions.
- 520 KB of on-chip SRAM for data and instructions.
- 8 KB of SRAM in RTC, which is called RTC FAST Memory and can be used for data storage; it is accessed by the main CPU during RTC Boot from the Deep-sleep mode.
- 8 KB of SRAM in RTC, which is called RTC SLOW Memory and can be accessed by the co-processor during the Deep-sleep mode.
- 1 Kbit of eFuse: 256 bits are used for the system (MAC address and chip configuration) and the remaining 768 bits are reserved for customer applications, including flash-encryption and chip-ID.

3.2 External Flash and SRAM

ESP32 supports multiple external QSPI flash and SRAM chips. More details can be found in Chapter SPI in the *ESP32 Technical Reference Manual*. ESP32 also supports hardware encryption/decryption based on AES to protect developers' programs and data in flash.

ESP32 can access the external QSPI flash and SRAM through high-speed caches.

- The external flash can be mapped into CPU instruction memory space and read-only memory space simultaneously.
  - When external flash is mapped into CPU instruction memory space, up to 11 MB + 248 KB can be mapped at a time. Note that if more than 3 MB + 248 KB are mapped, cache performance will be reduced due to speculative reads by the CPU.
  - When external flash is mapped into read-only data memory space, up to 4 MB can be mapped at a time. 8-bit, 16-bit and 32-bit reads are supported.
- External SRAM can be mapped into CPU data memory space. Up to 4 MB can be mapped at a time. 8-bit, 16-bit and 32-bit reads and writes are supported.

Both ESP32-WROOM-32D and ESP32-WROOM-32U integrate a 4 MB of external SPI flash. The integrated SPI flash is connected to GPIO6, GPIO7, GPIO8, GPIO9, GPIO10 and GPIO11. These six pins cannot be used as regular GPIOs.

3.3 Crystal Oscillators

The module uses a 40-MHz crystal oscillator.

3.4 RTC and Low-Power Management

With the use of advanced power-management technologies, ESP32 can switch between different power modes.

For details on ESP32's power consumption in different power modes, please refer to section "RTC and Low-Power Management" in *ESP32 Datasheet*.

4. Peripherals and Sensors

Please refer to Section Peripherals and Sensors in *ESP32 Datasheet*.

Note:
External connections can be made to any GPIO except for GPIOs in the range 6-11. These six GPIOs are connected to the module's integrated SPI flash. For details, please see Section 6 Schematics.

5. Electrical Characteristics

5.1 Absolute Maximum Ratings

Stresses beyond the absolute maximum ratings listed in Table 5 below may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and do not refer to the functional operation of the device that should follow the recommended operating conditions.

Table 5: Absolute Maximum Ratings

Symbol	Parameter	Min	Max	Unit
VDD33	Power supply voltage	–0.3	3.6	V
I_{output}[1]	Cumulative IO output current	-	1,100	mA
T_{store}	Storage temperature	–40	150	°C

1. The module worked properly after a 24-hour test in ambient temperature at 25 °C, and the IOs in three domains (VDD3P3_RTC, VDD3P3_CPU, VDD_SDIO) output high logic level to ground. Please note that pins occupied by flash and/or PSRAM in the VDD_SDIO power domain were excluded from the test.
2. Please see Appendix IO_MUX of *ESP32 Datasheet* for IO's power domain.

5.2 Recommended Operating Conditions

Table 6: Recommended Operating Conditions

Symbol	Parameter	Min	Typical	Max	Unit
VDD33	Power supply voltage	3.0	3.3	3.6	V
I_{VDD}	Current delivered by external power supply	0.5	-	-	A
T	Operating temperature	–40	-	85	°C

5.3 DC Characteristics (3.3 V, 25 °C)

Table 7: DC Characteristics (3.3 V, 25 °C)

Symbol	Parameter		Min	Typ	Max	Unit
C_{IN}	Pin capacitance		-	2	-	pF
V_{IH}	High-level input voltage		0.75×VDD[1]	-	VDD[1]+0.3	V
V_{IL}	Low-level input voltage		–0.3	-	0.25×VDD[1]	V
I_{IH}	High-level input current		-	-	50	nA
I_{IL}	Low-level input current		-	-	50	nA
V_{OH}	High-level output voltage		0.8×VDD[1]	-	-	V
V_{OL}	Low-level output voltage		-	-	0.1×VDD[1]	V
I_{OH}	High-level source current (VDD[1] = 3.3 V, V_{OH} >= 2.64 V, output drive strength set to the maximum)	VDD3P3_CPU power domain [1, 2]	-	40	-	mA
		VDD3P3_RTC power domain [1, 2]	-	40	-	mA
		VDD_SDIO power domain [1, 3]	-	20	-	mA

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
I_{OL}	Low-level sink current (VDD[1] = 3.3 V, V_{OL} = 0.495 V, output drive strength set to the maximum)	-	28	-	mA
R_{PU}	Resistance of internal pull-up resistor	-	45	-	kΩ
R_{PD}	Resistance of internal pull-down resistor	-	45	-	kΩ
V_{IL_nRST}	Low-level input voltage of CHIP_PU to power off the chip	-	-	0.6	V

Notes:

1. Please see Appendix IO_MUX of *ESP32 Datasheet* for IO's power domain. VDD is the I/O voltage for a particular power domain of pins.
2. For VDD3P3_CPU and VDD3P3_RTC power domain, per-pin current sourced in the same domain is gradually reduced from around 40 mA to around 29 mA, V_{OH}>=2.64 V, as the number of current-source pins increases.
3. Pins occupied by flash and/or PSRAM in the VDD_SDIO power domain were excluded from the test.

6. Schematics

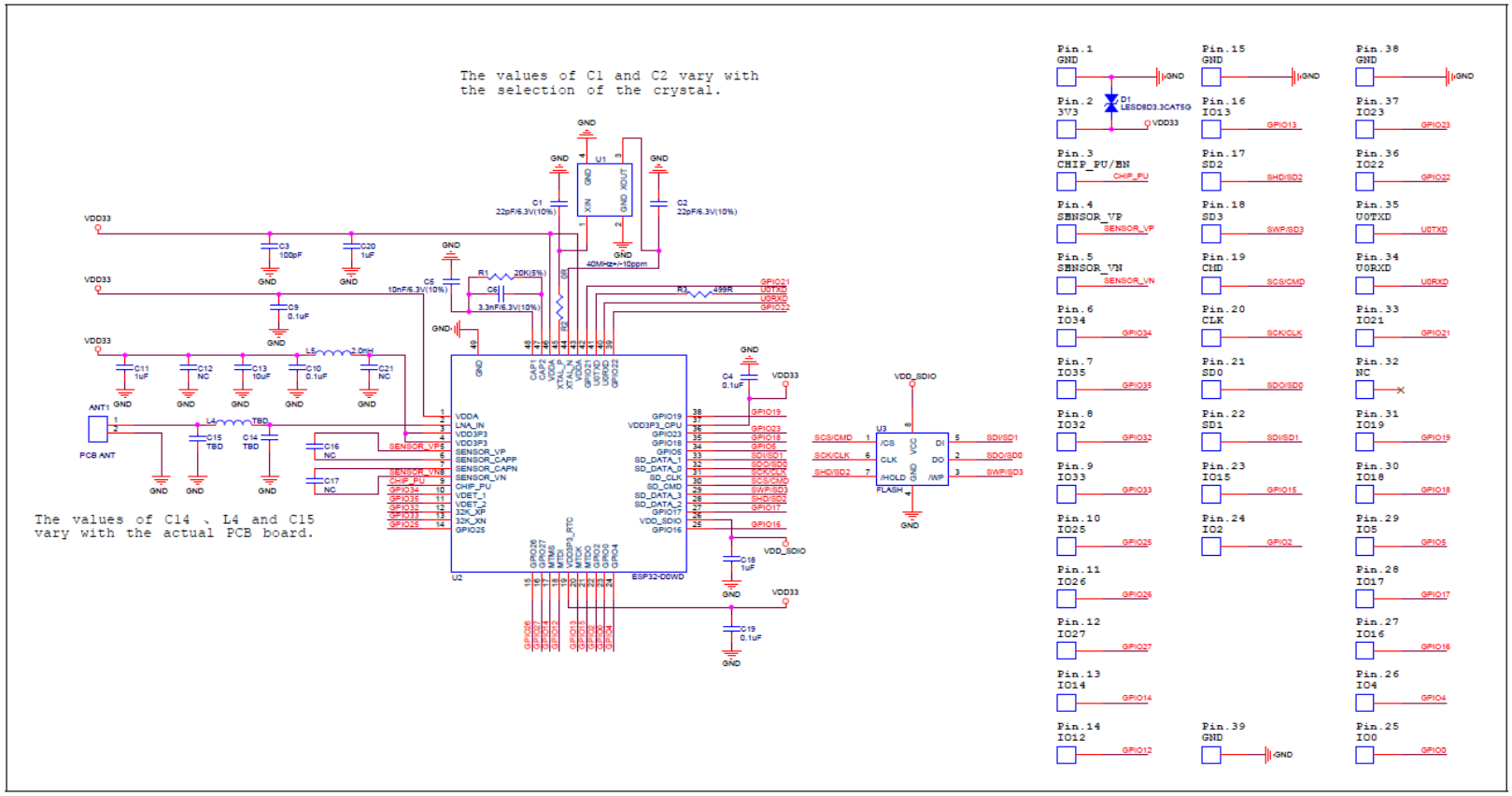


Figure 3: ESP32-WROOM-32D Schematics

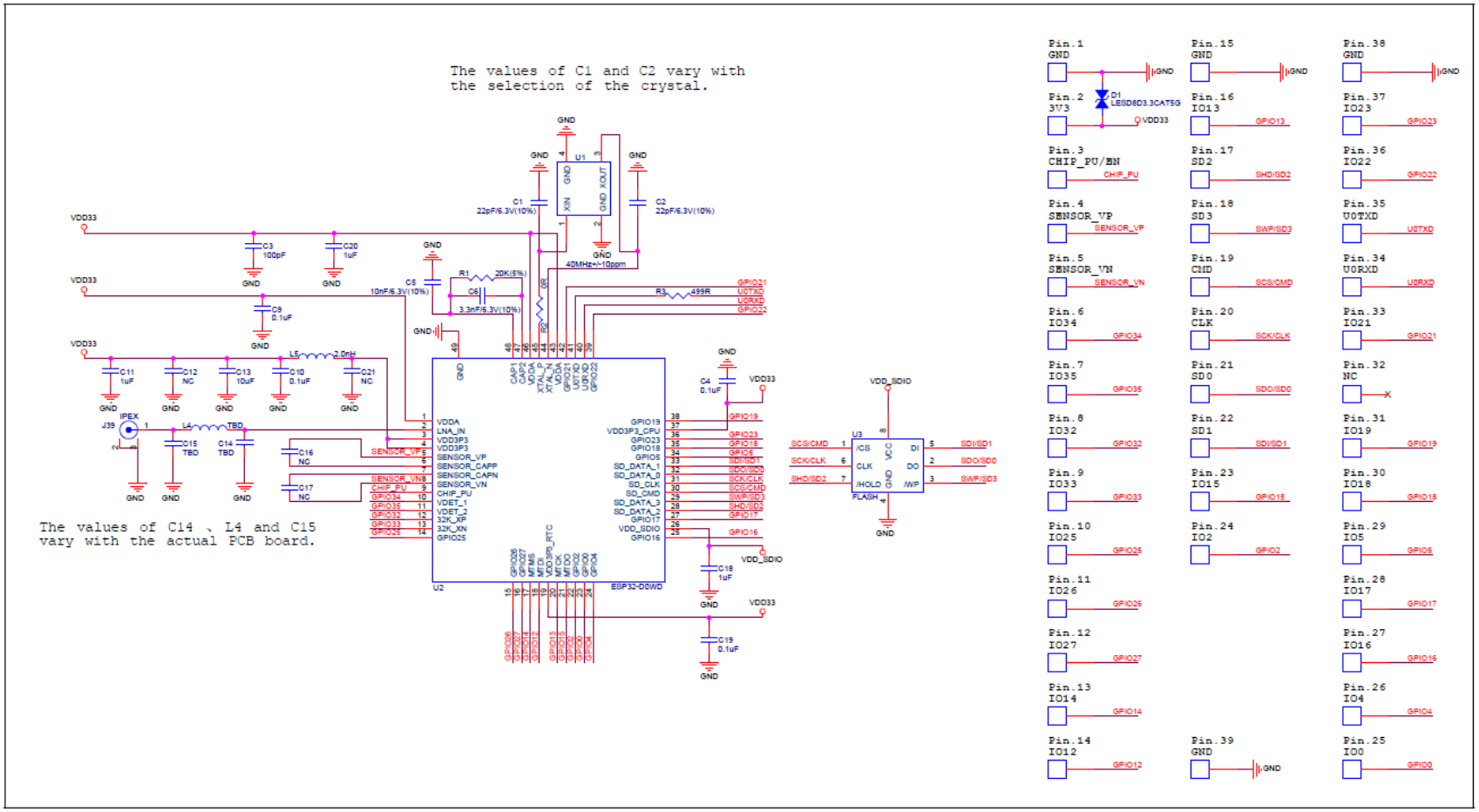


Figure 4: ESP32-WROOM-32U Schematics

7. Peripheral Schematics

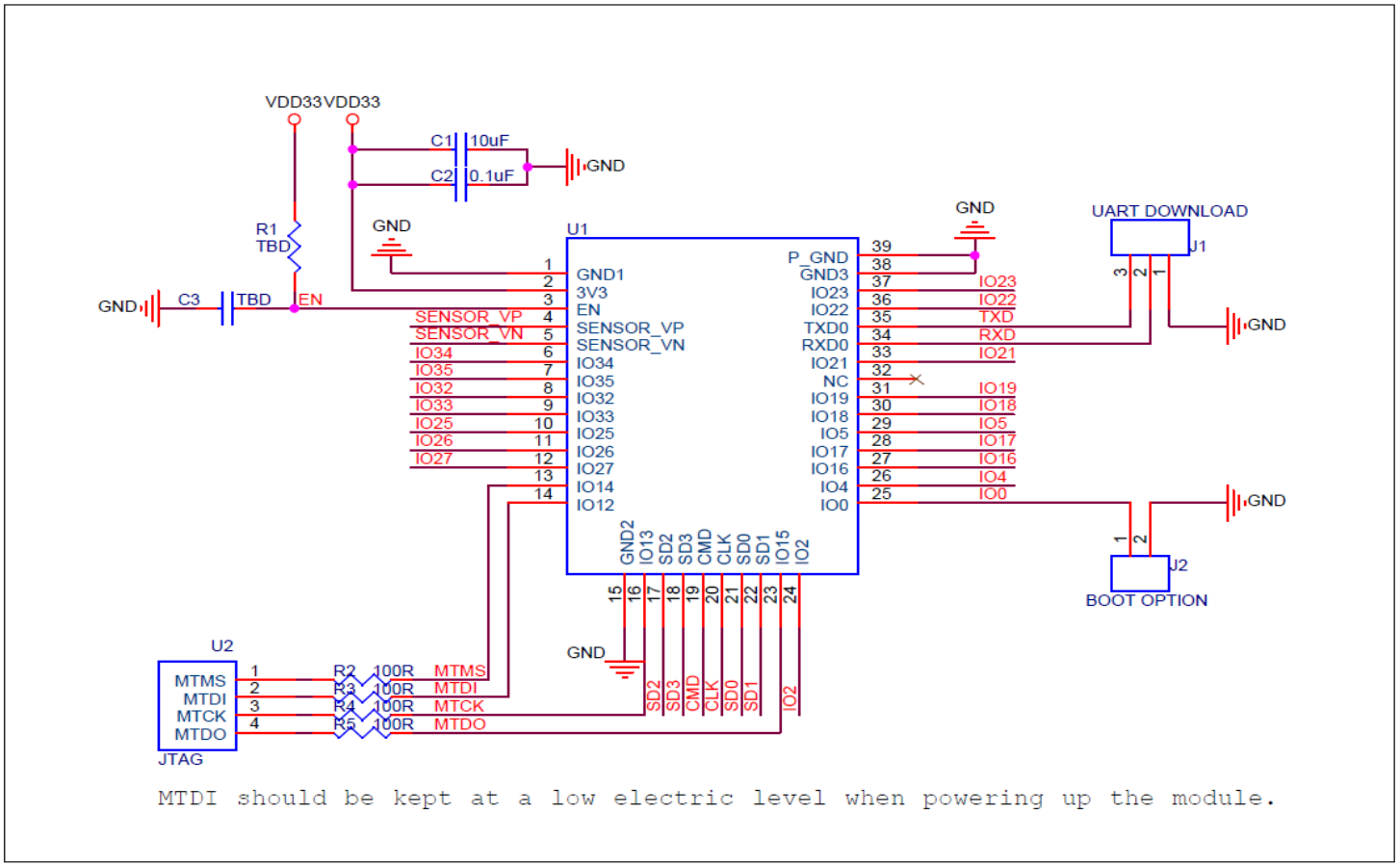


Figure 5: ESP32-WROOM-32D & ESP32-WROOM-32U Peripheral Schematics

ALLEGRO microsystems

ACS758xCB

Thermally Enhanced, Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 100 µΩ Current Conductor

FEATURES AND BENEFITS

- Industry-leading noise performance through proprietary amplifier and filter design techniques
- Integrated shield greatly reduces capacitive coupling from current conductor to die due to high dV/dt signals, and prevents offset drift in high-side, high-voltage applications
- Total output error improvement through gain and offset trim over temperature
- Small package size, with easy mounting capability
- Monolithic Hall IC for high reliability
- Ultralow power loss: 100 µΩ internal conductor resistance
- Galvanic isolation allows use in economical, high-side current sensing in high-voltage systems
- AEC-Q100 qualified

Continued on the next page…

TÜV America Certificate Number: U8V 15 05 54214 037

UL Certified File No.: US-29755-UL

PACKAGE: 5-Pin CB Package

PFF Leadform | PSF Leadform | PSS Leadform

DESCRIPTION

The Allegro™ ACS758 family of current sensor ICs provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing. Typical applications include motor control, load detection and management, power supply and DC-to-DC converter control, inverter control, and overcurrent fault detection.

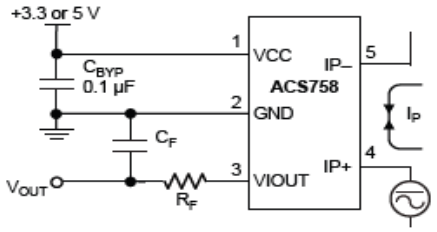
The device consists of a precision, low-offset linear Hall circuit with a copper conduction path located near the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which the Hall IC converts into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional output voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy at the factory.

High-level immunity to current conductor dV/dt and stray electric fields, offered by Allegro proprietary integrated shield technology, provides low output voltage ripple and low offset drift in high-side, high-voltage applications.

The output of the device has a positive slope ($>V_{CC}/2$) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from terminal 4 to terminal 5), which is the path used for current sampling. The internal resistance of this conductive path is 100 µΩ typical, providing low power loss.

The thickness of the copper conductor allows survival of the device at high overcurrent conditions. The terminals of the conductive path are electrically isolated from the signal leads

Continued on the next page…



Application 1: The ACS758 outputs an analog signal, V_{OUT}, that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sampled current, I_P, within the range specified. C_F is for optimal noise management, with values that depend on the application.

Typical Application

ACS758xCB

Thermally Enhanced, Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 100 µΩ Current Conductor

COMMON OPERATING CHARACTERISTICS [1]: Valid at T_{OP} = –40°C to 150°C and V_{CC} = 5 V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Supply Voltage [2]	V_{CC}		3	5.0	5.5	V
Supply Current	I_{CC}	Output open	–	10	13.5	mA
Power-On Delay	t_{POD}	T_A = 25°C	–	10	–	µs
Rise Time [3]	t_r	I_P step = 60% of I_P+, 10% to 90% rise time, T_A = 25°C, C_{OUT} = 0.47 nF	–	3	–	µs
Propagation Delay Time [3]	t_{PROP}	T_A = 25°C, C_{OUT} = 0.47 nF	–	1	–	µs
Response Time	$t_{RESPONSE}$	Measured as sum of t_{PROP} and t_r	–	4	–	µs
Internal Bandwidth [4]	BW_i	–3 dB; T_A = 25°C, C_{OUT} = 0.47 nF	–	120	–	kHz
Output Load Resistance	$R_{LOAD(MIN)}$	VIOUT to GND	4.7	–	–	kΩ
Output Load Capacitance	$C_{LOAD(MAX)}$	VIOUT to GND	–	–	10	nF
Symmetry [3]	E_{SYM}	Over half-scale of I_P	99	100	101	%
Quiescent Output Voltage [5]	$V_{IOUT(QBI)}$	Bidirectional variant, I_P = 0 A, T_A = 25°C	–	V_{CC}/2	–	V
	$V_{IOUT(QUNI)}$	Unidirectional variant, I_P = 0 A, T_A = 25°C, $V_{IOUT(QUNI)}$ is ratiometric to V_{CC}	–	0.6	–	V
Ratiometry [3]	V_{RAT}	V_{CC} = 4.5 to 5.5 V	–	100	–	%

[1] Device is factory-trimmed at 5 V, for optimal accuracy.
[2] Devices are programmed for maximum accuracy at 5.0 V V_{CC} levels. The device contains ratiometry circuits that accurately alter the 0 A Output Voltage and Sensitivity level of the device in proportion to the applied V_{CC} level. However, as a result of minor nonlinearities in the ratiometry circuit, additional output error will result when V_{CC} varies from the 5 V V_{CC} level.
[3] See Characteristic Definitions section of this datasheet.
[4] Calculated using the formula BW_i = 0.35 / t_r.
[5] $V_{IOUT(Q)}$ may drift over the lifetime of the device by as much as ±25 mV.

X050B PERFORMANCE CHARACTERISTICS [1]: T_{OP} = –40°C to 150°C, V_{CC} = 5 V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Primary Sampled Current	I_P		–50	–	50	A
Sensitivity	$Sens_{TA}$	Full scale of I_P applied for 5 ms, T_A = 25°C	–	40	–	mV/A
	$Sens_{(TOP)HT}$	Full scale of I_P applied for 5 ms, T_{OP} = 25°C to 150°C	–	39.4	–	mV/A
	$Sens_{(TOP)LT}$	Full scale of I_P applied for 5 ms, T_{OP} = –40°C to 25°C	–	41	–	mV/A
Noise [2]	V_{NOISE}	T_A = 25°C, 10 nF on VIOUT pin to GND	–	10	–	mV
Nonlinearity	E_{LIN}	Up to full scale of I_P, I_P applied for 5 ms	–1	–	1	%
Electrical Offset Voltage [3]	$V_{OE(TA)}$	I_P = 0 A, T_A = 25°C	–	±5	–	mV
	$V_{OE(TOP)HT}$	I_P = 0 A, T_{OP} = 25°C to 150°C	–	±15	–	mV
	$V_{OE(TOP)LT}$	I_P = 0 A, T_{OP} = –40°C to 25°C	–	±35	–	mV
Magnetic Offset Error	I_{ERROM}	I_P = 0 A, T_A = 25°C, after excursion of 50 A	–	100	–	mA
Total Output Error [4]	$E_{TOT(HT)}$	Over full scale of I_P, I_P applied for 5 ms, T_{OP} = 25°C to 150°C	–	–1.2	–	%
	$E_{TOT(LT)}$	Over full scale of I_P, I_P applied for 5 ms, T_{OP} = –40°C to 25°C	–	2	–	%

[1] See Characteristic Performance Data page for parameter distributions over temperature range.
[2] ±3 sigma noise voltage.
[3] $V_{OE(TOP)}$ drift is referred to ideal $V_{IOUT(Q)}$ = 2.5 V.
[4] Percentage of I_P. Output filtered.

1.3 Performance

Parameter	Specification					
Receiver type	72-channel u-blox M8 engine GPS L1C/A, SBAS L1C/A, QZSS L1C/A, QZSS L1 SAIF, GLONASS L1OF, BeiDou B1I, Galileo E1B/C					
Accuracy of time pulse signal	RMS 99%	30 ns 60 ns				
Frequency of time pulse signal		0.25 Hz...10 MHz (configurable)				
Operational limits [1]	Dynamics	≤ 4 g				
	Altitude	50,000 m				
	Velocity	500 m/s				
Velocity accuracy [2]		0.05 m/s				
Heading accuracy [2]		0.3 degrees				
GNSS		**GPS & GLONASS**	**GPS**	**GLONASS**	**BeiDou**	**Galileo**
Horizontal position accuracy [3]	 With SBAS	2.5 m 2.0 m	2.5 m 2.0 m	4 m -	3 m -	3 m -
NEO-M8N/Q						
Max navigation update rate	NEO-M8N	5 Hz	10 Hz	10 Hz	10 Hz	10 Hz
	NEO-M8Q	10 Hz	18 Hz	18 Hz	18 Hz	18 Hz
Time-To-First-Fix [4]	Cold start	26 s	29 s	30 s	34 s	45 s
	Hot start	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s
	Aided starts [5]	2 s	2 s	2 s	3 s	7 s
Sensitivity[6]	Tracking & Navigation	–167 dBm	–166 dBm	-166 dBm	-160 dBm	-159 dBm
	Reacquisition	–160 dBm	–160 dBm	-156 dBm	-157 dBm	-153 dBm
	Cold start	–148 dBm	–148 dBm	-145 dBm	-143 dBm	-138 dBm
	Hot start	–157 dBm	–157 dBm	-156 dBm	-155 dBm	-151 dBm
NEO-M8J/M						
Max navigation update rate	NEO-M8J	5 Hz	10 Hz	10 Hz	10 Hz	10 Hz
	NEO-M8M	10 Hz	18 Hz	18 Hz	18 Hz	18 Hz
Time-To-First-Fix [4]	Cold start	26 s	30 s	33 s	39 s	57 s
	Hot start	1 s	1 s	1 s	1 s	1 s
	Aided starts [6]	3 s	3 s	3 s	7 s	7 s
Sensitivity [6]	Tracking & Navigation	-164 dBm	-164 dBm	-163 dBm	-160 dBm	-154 dBm
	Reacquisition	-160 dBm	-159 dBm	-156 dBm	-155 dBm	-152dBm
	Cold start	-148 dBm	-147 dBm	-145 dBm	-143 dBm	-133 dBm
	Hot start	-157 dBm	-156 dBm	-155 dBm	-155 dBm	-151 dBm

Table 1: NEO-M8 performance in different GNSS modes (default: concurrent reception of GPS and GLONASS including QZSS, SBAS)

4 Electrical specification

☞ The limiting values given are in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134). Stress above one or more of the limiting values may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and operation of the device at these or at any other conditions above those given in the characteristics sections of the specification is not implied. Exposure to these limits for extended periods may affect device reliability.

☞ Where application information is given, it is advisory only and does not form part of the specification. For more information, see the NEO-8Q / NEO-M8 Hardware integration manual [1].

4.1 Absolute maximum rating

Parameter	Symbol	Condition	Min	Max	Units
Power supply voltage	VCC		–0.5	3.6	V
Backup battery voltage	V_BCKP		–0.5	3.6	V
USB supply voltage	VDD_USB		–0.5	3.6	V
Input pin voltage	V_{IN}	If VCC < 3.1V If VCC > 3.1V	–0.5 –0.5	VCC+0.5 3.6	V V
	V_{IN_USB}		–0.5	VDD_USB	V
DC current through any digital I/O pin (except supplies)	I_{PIN}			10	mA
VCC_RF output current	ICC_RF			100	mA
Input power at RF_IN	P_{RFIN}	source impedance = 50 Ω, continuous wave		15	dBm
Storage temperature	T_{STG}	NEO-M8N/M8Q/M8J NEO-M8M	–40 –40	85 105	°C

Table 9: Absolute maximum ratings

⚠ Stressing the device beyond the "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage. These are stress ratings only. The product is not protected against overvoltage or reversed voltages. If necessary, voltage spikes exceeding the power supply voltage specification, given in Table 9, must be limited to values within the specified boundaries by using appropriate protection diodes.

4.2 Operating conditions

☞ All specifications are at an ambient temperature of +25 °C. Extreme operating temperatures can significantly impact specification values. Applications operating near the temperature limits should be tested to ensure the specification.

Parameter	Symbol	Min	Typical	Max	Units	Condition
Power supply voltage NEO-M8N/Q/J	VCC	2.7	3.0	3.6	V	
Power supply voltage NEO-M8M	VCC	1.65	1.8, 3.0	3.6	V	
Supply voltage USB	VDDUSB	3.0	3.3	3.6	V	
Backup battery voltage	V_BCKP	1.4		3.6	V	
Backup battery current	I_BCKP		15		µA	V_BCKP = 1.8 V, VCC = 0 V
SW backup current	I_SWBCKP		30		µA	VCC = 3 V
Input pin voltage range	V_{IN}	0		VCC	V	
Digital IO pin low level input voltage	V_{IL}	0		0.2*VCC	V	
Digital IO pin high level input voltage	V_{IH}	0.7*VCC		VCC	V	

Parameter	Symbol	Min	Typical	Max	Units	Condition
Digital IO pin low level output voltage	V_{OL}			0.4	V	I_{OL} = 4mA
Digital IO pin high level output voltage	V_{OH}	VCC–0.4			V	I_{OH} = 4mA
Pull-up resistor for RESET_N (internal)	R_{PU}		11		kΩ	
USB_DM, USB_DP	V_{IN}U	Compatible with USB with 27 Ω series resistance				
VCC_RF voltage	VCC_RF		VCC–0.1		V	
VCC_RF output current	ICC_RF			50	mA	
Receiver chain noise figure [12]	NF_{TOT}		2.0		dB	
Operating temperature	T_{OPR}	–40		85	°C	

Table 10: Operating conditions

☞ Operation beyond the specified operating conditions can affect device reliability.

4.3 Indicative current requirements

Table 11 lists examples of the total system supply current for a possible application.

☞ Values in Table 11 are provided for customer information only as an example of typical power requirements. Values are characterized on samples, actual power requirements can vary depending on FW version used, external circuitry, number of SVs tracked, signal strength, type of start as well as time, duration and conditions of test.

Parameter	Symbol	Module	Typical GPS & GLONASS	Typical GPS	Max	Units	Condition
Max. supply current [13]	I_{OCP}	All			67	mA	
Average supply current [14, 15]	I_{OC} Acquisition [16]	NEO-M8N	32	25		mA	Estimated at 3 V
		NEO-M8M	24	19		mA	
		NEO-M8Q	30	24		mA	
		NEO-M8J	31	24		mA	
	I_{OC} Tracking (continuous mode)	NEO-M8N	30	23		mA	Estimated at 3 V
		NEO-M8M	21	17		mA	
		NEO-M8Q	28	23		mA	
		NEO-M8J	29	23		mA	
	I_{OC} Tracking (Power Save mode / 1 Hz)	NEO-M8N	13	12		mA	Estimated at 3 V
		NEO-M8M	5.3	4.8		mA	
		NEO-M8Q	11.5	11.1		mA	
		NEO-M8J	12	11		mA	

Table 11: Indicative power requirements at 3.0 V

☞ For more information about power requirements, see the NEO-8Q / NEO-M8 Hardware integration manual [1].

☞ For more information on how to noticeably reduce current consumption, see the Power Management Application Note [5].

4 Electrical specification

The limiting values given are in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134). Stress above one or more of the limiting values may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and operation of the device at these or at any other conditions above those given in the characteristics sections of the specification is not implied. Exposure to these limits for extended periods may affect device reliability.

Where application information is given, it is advisory only and does not form part of the specification. For more information, see the NEO-8Q / NEO-M8 Hardware integration manual [1].

4.1 Absolute maximum rating

Parameter	Symbol	Condition	Min	Max	Units
Power supply voltage	VCC		–0.5	3.6	V
Backup battery voltage	V_BCKP		–0.5	3.6	V
USB supply voltage	VDD_USB		–0.5	3.6	V
Input pin voltage	V_{IN}	If VCC < 3.1V If VCC > 3.1V	–0.5 -0.5	VCC+0.5 3.6	V V
	V_{IN_USB}		–0.5	VDD_USB	V
DC current through any digital I/O pin (except supplies)	I_{PIN}			10	mA
VCC_RF output current	ICC_RF			100	mA
Input power at RF_IN	P_{RFIN}	source impedance = 50 Ω, continuous wave		15	dBm
Storage temperature	T_{STG}	NEO-M8N/M8Q/M8J NEO-M8M	–40 –40	85 105	°C

Table 9: Absolute maximum ratings

Stressing the device beyond the "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage. These are stress ratings only. The product is not protected against overvoltage or reversed voltages. If necessary, voltage spikes exceeding the power supply voltage specification, given in Table 9, must be limited to values within the specified boundaries by using appropriate protection diodes.

4.2 Operating conditions

All specifications are at an ambient temperature of +25 °C. Extreme operating temperatures can significantly impact specification values. Applications operating near the temperature limits should be tested to ensure the specification.

Parameter	Symbol	Min	Typical	Max	Units	Condition
Power supply voltage NEO-M8N/Q/J	VCC	2.7	3.0	3.6	V	
Power supply voltage NEO-M8M	VCC	1.65	1.8, 3.0	3.6	V	
Supply voltage USB	VDDUSB	3.0	3.3	3.6	V	
Backup battery voltage	V_BCKP	1.4		3.6	V	
Backup battery current	I_BCKP		15		µA	V_BCKP = 1.8 V, VCC = 0 V
SW backup current	I_SWBCKP		30		µA	VCC = 3 V
Input pin voltage range	V_{IN}	0		VCC	V	
Digital IO pin low level input voltage	V_{IL}	0		0.2*VCC	V	
Digital IO pin high level input voltage	V_{IH}	0.7*VCC		VCC	V	

Parameter	Symbol	Min	Typical	Max	Units	Condition
Digital IO pin low level output voltage	V_{OL}			0.4	V	I_{OL} = 4mA
Digital IO pin high level output voltage	V_{OH}	VCC–0.4			V	I_{OH} = 4mA
Pull-up resistor for RESET_N (internal)	R_{PU}		11		kΩ	
USB_DM, USB_DP	V_{IN}U	Compatible with USB with 27 Ω series resistance				
VCC_RF voltage	VCC_RF		VCC–0.1		V	
VCC_RF output current	ICC_RF			50	mA	
Receiver chain noise figure [12]	NF_{TOT}		2.0		dB	
Operating temperature	T_{OPR}	–40		85	°C	

Table 10: Operating conditions

Operation beyond the specified operating conditions can affect device reliability.

4.3 Indicative current requirements

Table 11 lists examples of the total system supply current for a possible application.

Values in Table 11 are provided for customer information only as an example of typical power requirements. Values are characterized on samples, actual power requirements can vary depending on FW version used, external circuitry, number of SVs tracked, signal strength, type of start as well as time, duration and conditions of test.

Parameter	Symbol	Module	Typical GPS & GLONASS	Typical GPS	Max	Units	Condition
Max. supply current [13]	I_{CCP}	All			67	mA	
Average supply current [14, 15]	I_{CC} Acquisition [16]	NEO-M8N	32	25		mA	Estimated at 3 V
		NEO-M8M	24	19		mA	
		NEO-M8Q	30	24		mA	
		NEO-M8J	31	24		mA	
	I_{CC} Tracking (continuous mode)	NEO-M8N	30	23		mA	Estimated at 3 V
		NEO-M8M	21	17		mA	
		NEO-M8Q	28	23		mA	
		NEO-M8J	29	23		mA	
	I_{CC} Tracking (Power Save mode / 1 Hz)	NEO-M8N	13	12		mA	Estimated at 3 V
		NEO-M8M	5.3	4.8		mA	
		NEO-M8Q	11.5	11.1		mA	
		NEO-M8J	12	11		mA	

Table 11: Indicative power requirements at 3.0 V

For more information about power requirements, see the NEO-8Q / NEO-M8 Hardware integration manual [1].

For more information on how to noticeably reduce current consumption, see the Power Management Application Note [5].

1.2 Purpose and Scope

This document provides a description, specifications, and design related information on the MPU-9250 MotionTracking device. The device is housed in a small 3x3x1mm QFN package.

Specifications are subject to change without notice. Final specifications will be updated based upon characterization of production silicon. For references to register map and descriptions of individual registers, please refer to the MPU-9250 Register Map and Register Descriptions document.

1.3 Product Overview

MPU-9250 is a multi-chip module (MCM) consisting of two dies integrated into a single QFN package. One die houses the 3-Axis gyroscope and the 3-Axis accelerometer. The other die houses the AK8963 3-Axis magnetometer from Asahi Kasei Microdevices Corporation. Hence, the MPU-9250 is a 9-axis MotionTracking device that combines a 3-axis gyroscope, 3-axis accelerometer, 3-axis magnetometer and a Digital Motion Processor™ (DMP) all in a small 3x3x1mm package available as a pin-compatible upgrade from the MPU-6515. With its dedicated I^2C sensor bus, the MPU-9250 directly provides complete 9-axis MotionFusion™ output. The MPU-9250 MotionTracking device, with its 9-axis integration, on-chip MotionFusion™, and run-time calibration firmware, enables manufacturers to eliminate the costly and complex selection, qualification, and system level integration of discrete devices, guaranteeing optimal motion performance for consumers. MPU-9250 is also designed to interface with multiple non-inertial digital sensors, such as pressure sensors, on its auxiliary I^2C port.

MPU-9250 features three 16-bit analog-to-digital converters (ADCs) for digitizing the gyroscope outputs, three 16-bit ADCs for digitizing the accelerometer outputs, and three 16-bit ADCs for digitizing the magnetometer outputs. For precision tracking of both fast and slow motions, the parts feature a user-programmable gyroscope full-scale range of ±250, ±500, ±1000, and ±2000°/sec (dps), a user-programmable accelerometer full-scale range of ±2*g*, ±4*g*, ±8*g*, and ±16*g*, and a magnetometer full-scale range of ±4800µT.

Other industry-leading features include programmable digital filters, a precision clock with 1% drift from -40°C to 85°C, an embedded temperature sensor, and programmable interrupts. The device features I^2C and SPI serial interfaces, a VDD operating range of 2.4V to 3.6V, and a separate digital IO supply, VDDIO from 1.71V to VDD.

Communication with all registers of the device is performed using either I^2C at 400kHz or SPI at 1MHz. For applications requiring faster communications, the sensor and interrupt registers may be read using SPI at 20MHz.

By leveraging its patented and volume-proven CMOS-MEMS fabrication platform, which integrates MEMS wafers with companion CMOS electronics through wafer-level bonding, InvenSense has driven the package size down to a footprint and thickness of 3x3x1mm, to provide a very small yet high performance low cost package. The device provides high robustness by supporting 10,000*g* shock reliability.

1.4 Applications

- Location based services, points of interest, and dead reckoning
- Handset and portable gaming
- Motion-based game controllers
- 3D remote controls for Internet connected DTVs and set top boxes, 3D mice
- Wearable sensors for health, fitness and sports

2 Features

2.1 Gyroscope Features

The triple-axis MEMS gyroscope in the MPU-9250 includes a wide range of features:

- Digital-output X-, Y-, and Z-Axis angular rate sensors (gyroscopes) with a user-programmable full-scale range of ±250, ±500, ±1000, and ±2000°/sec and integrated 16-bit ADCs
- Digitally-programmable low-pass filter
- Gyroscope operating current: 3.2mA
- Sleep mode current: 8µA
- Factory calibrated sensitivity scale factor
- Self-test

2.2 Accelerometer Features

The triple-axis MEMS accelerometer in MPU-9250 includes a wide range of features:

- Digital-output triple-axis accelerometer with a programmable full scale range of ±2*g*, ±4*g*, ±8*g* and ±16*g* and integrated 16-bit ADCs
- Accelerometer normal operating current: 450µA
- Low power accelerometer mode current: 8.4µA at 0.98Hz, 19.8µA at 31.25Hz
- Sleep mode current: 8µA
- User-programmable interrupts
- Wake-on-motion interrupt for low power operation of applications processor
- Self-test

2.3 Magnetometer Features

The triple-axis MEMS magnetometer in MPU-9250 includes a wide range of features:

- 3-axis silicon monolithic Hall-effect magnetic sensor with magnetic concentrator
- Wide dynamic measurement range and high resolution with lower current consumption.
- Output data resolution of 14 bit (0.6µT/LSB)
- Full scale measurement range is ±4800µT
- Magnetometer normal operating current: 280µA at 8Hz repetition rate
- Self-test function with internal magnetic source to confirm magnetic sensor operation on end products

2.4 Additional Features

The MPU-9250 includes the following additional features:

- Auxiliary master I²C bus for reading data from external sensors (e.g. pressure sensor)
- 3.5mA operating current when all 9 motion sensing axes and the DMP are enabled
- VDD supply voltage range of 2.4 – 3.6V
- VDDIO reference voltage for auxiliary I²C devices
- Smallest and thinnest QFN package for portable devices: 3x3x1mm
- Minimal cross-axis sensitivity between the accelerometer, gyroscope and magnetometer axes
- 512 byte FIFO buffer enables the applications processor to read the data in bursts
- Digital-output temperature sensor
- User-programmable digital filters for gyroscope, accelerometer, and temp sensor
- 10,000 *g* shock tolerant
- 400kHz Fast Mode I²C for communicating with all registers
- 1MHz SPI serial interface for communicating with all registers

- 20MHz SPI serial interface for reading sensor and interrupt registers
- MEMS structure hermetically sealed and bonded at wafer level
- RoHS and Green compliant

2.5 MotionProcessing

- Internal Digital Motion Processing™ (DMP™) engine supports advanced MotionProcessing and low power functions such as gesture recognition using programmable interrupts
- Low-power pedometer functionality allows the host processor to sleep while the DMP maintains the step count.

InvenSense Sensing Everything	MPU-9250 Product Specification	Document Number: PS-MPU-9250A-01 Revision: 1.1 Release Date: 06/20/2016

3 Electrical Characteristics

3.1 Gyroscope Specifications

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, T_A=25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Full-Scale Range	FS_SEL=0		±250		°/s
	FS_SEL=1		±500		°/s
	FS_SEL=2		±1000		°/s
	FS_SEL=3		±2000		°/s
Gyroscope ADC Word Length			16		bits
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(°/s)
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(°/s)
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(°/s)
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(°/s)
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C		±3		%
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±4		%
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		±0.1		%
Cross-Axis Sensitivity			±2		%
Initial ZRO Tolerance	25°C		±5		°/s
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±30		°/s
Total RMS Noise	DLPFCFG=2 (92 Hz)		0.1		°/s-rms
Rate Noise Spectral Density			0.01		°/s/√Hz
Gyroscope Mechanical Frequencies		25	27	29	KHz
Low Pass Filter Response	Programmable Range	5		250	Hz
Gyroscope Startup Time	From Sleep mode		35		ms
Output Data Rate	Programmable, Normal mode	4		8000	Hz

Table 1 Gyroscope Specifications

3.2 Accelerometer Specifications

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, T_A=25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		*g*
	AFS_SEL=1		±4		*g*
	AFS_SEL=2		±8		*g*
	AFS_SEL=3		±16		*g*
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/*g*
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/*g*
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/*g*
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/*g*
Initial Tolerance	Component-Level		±3		%
Sensitivity Change vs. Temperature	-40°C to +85°C AFS_SEL=0 Component-level		±0.026		%/°C
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		±0.5		%
Cross-Axis Sensitivity			±2		%
Zero-G Initial Calibration Tolerance	Component-level, X,Y		±60		mg
	Component-level, Z		±80		mg
Zero-G Level Change vs. Temperature	-40°C to +85°C		±1.5		mg/°C
Noise Power Spectral Density	Low noise mode		300		µg/√Hz
Total RMS Noise	DLPFCFG=2 (94Hz)			8	mg-rms
Low Pass Filter Response	Programmable Range	5		260	Hz
Intelligence Function Increment			4		mg/LSB
Accelerometer Startup Time	From Sleep mode		20		ms
	From Cold Start, 1ms V_{DD} ramp		30		ms
Output Data Rate	Low power (duty-cycled)	0.24		500	Hz
	Duty-cycled, over temp		±15		%
	Low noise (active)	4		4000	Hz

Table 2 Accelerometer Specifications

InvenSense Sensing Everything | **MPU-9250 Product Specification** | Document Number: PS-MPU-9250A-01 Revision: 1.1 Release Date: 06/20/2016

3.3 Magnetometer Specifications

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, T_A=25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
MAGNETOMETER SENSITIVITY					
Full-Scale Range			±4800		µT
ADC Word Length			14		bits
Sensitivity Scale Factor			0.6		µT / LSB
ZERO-FIELD OUTPUT					
Initial Calibration Tolerance			±500		LSB

3.4 Electrical Specifications

3.4.1 D.C. Electrical Characteristics

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, T_A=25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
	SUPPLY VOLTAGES					
VDD		2.4	2.5	3.6	V	
VDDIO		1.71	1.8	VDD	V	
	SUPPLY CURRENTS					
Normal Mode	9-axis (no DMP), 1 kHz gyro ODR, 4 kHz accel ODR, 8 Hz mag. repetition rate		3.7		mA	
	6-axis (accel + gyro, no DMP), 1 kHz gyro ODR, 4 kHz accel ODR		3.4		mA	
	3-axis Gyroscope only (no DMP), 1 kHz ODR		3.2		mA	
	6-axis (accel + magnetometer, no DMP), 4 kHz accel ODR, mag. repetition rate = 8 Hz		730		µA	
	3-Axis Accelerometer, 4kHz ODR (no DMP)		450		µA	
	3-axis Magnetometer only (no DMP), 8 Hz repetition rate		280		µA	
Accelerometer Low Power Mode (DMP, Gyroscope, Magnetometer disabled)	0.98 Hz update rate		8.4		µA	1
	31.25 Hz update rate		19.8		µA	1
Full Chip Idle Mode Supply Current			8		µA	
	TEMPERATURE RANGE					
Specified Temperature Range	Performance parameters are not applicable beyond Specified Temperature Range	-40		+85	°C	

Table 3 D.C. Electrical Characteristics

Notes:

1. Accelerometer Low Power Mode supports the following output data rates (ODRs): 0.24, 0.49, 0.98, 1.95, 3.91, 7.81, 15.63, 31.25, 62.50, 125, 250, 500Hz. Supply current for any update rate can be calculated as:

   Supply Current in µA = Sleep Current + Update Rate * 0.376

3.4.2 A.C. Electrical Characteristics

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, T_A=25°C, unless otherwise noted.

Parameter	Conditions	MIN	TYP	MAX	Units
Supply Ramp Time	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value	0.1		100	ms
Operating Range	Ambient	-40		85	°C
Sensitivity	Untrimmed		333.87		LSB/°C
Room Temp Offset	21°C		0		LSB
Supply Ramp Time (T_{RAMP})	Valid power-on RESET	0.01	20	100	ms
Start-up time for register read/write	From power-up		11	100	ms
I²C ADDRESS	AD0 = 0 AD0 = 1		1101000 1101001		
V_{IH}, High Level Input Voltage		0.7*VDDIO			V
V_{IL}, Low Level Input Voltage				0.3*VDDIO	V
C_I, Input Capacitance			< 10		pF
V_{OH}, High Level Output Voltage	R_{LOAD}=1MΩ;	0.9*VDDIO			V
V_{OL1}, LOW-Level Output Voltage	R_{LOAD}=1MΩ;			0.1*VDDIO	V
$V_{OL,INT1}$, INT Low-Level Output Voltage	OPEN=1, 0.3mA sink Current			0.1	V
Output Leakage Current	OPEN=1		100		nA
t_{INT}, INT Pulse Width	LATCH_INT_EN=0		50		µs
V_{IL}, LOW Level Input Voltage		-0.5V		0.3*VDDIO	V
V_{IH}, HIGH-Level Input Voltage		0.7*VDDIO		VDDIO + 0.5V	V
V_{hys}, Hysteresis			0.1*VDDIO		V
V_{OL}, LOW-Level Output Voltage	3mA sink current	0		0.4	V
I_{OL}, LOW-Level Output Current	V_{OL}=0.4V V_{OL}=0.6V		3 6		mA mA
Output Leakage Current			100		nA
t_{of}, Output Fall Time from V_{IHmax} to V_{ILmax}	C_b bus capacitance in pf	20+0.1C_b		250	ns
V_{IL}, LOW-Level Input Voltage		-0.5V		0.3*VDDIO	V
V_{IH}, HIGH-Level Input Voltage		0.7* VDDIO		VDDIO + 0.5V	V
V_{hys}, Hysteresis			0.1* VDDIO		V
V_{OL1}, LOW-Level Output Voltage	VDDIO > 2V; 1mA sink current	0		0.4	V
V_{OL3}, LOW-Level Output Voltage	VDDIO < 2V; 1mA sink current	0		0.2* VDDIO	V
I_{OL}, LOW-Level Output Current	V_{OL} = 0.4V V_{OL} = 0.6V		3 6		mA mA
Output Leakage Current			100		nA
t_{of}, Output Fall Time from V_{IHmax} to V_{ILmax}	C_b bus capacitance in pF	20+0.1C_b		250	ns
Sample Rate	Fchoice=0,1,2 SMPLRT_DIV=0		32		kHz
	Fchoice=3; DLPFCFG=0 or 7 SMPLRT_DIV=0		8		kHz
	Fchoice=3; DLPFCFG=1,2,3,4,5,6; SMPLRT_DIV=0		1		kHz
Clock Frequency Initial Tolerance	CLK_SEL=0, 6; 25°C	-2		+2	%

	CLK_SEL=1,2,3,4,5; 25°C	-1		+1	%
Frequency Variation over Temperature	CLK_SEL=0,6	-10		+10	%
	CLK_SEL=1,2,3,4,5		±1		%

Table 4 A.C. Electrical Characteristics

InvenSense Sensing Everything | MPU-9250 Product Specification | Document Number: PS-MPU-9250A-01 Revision: 1.1 Release Date: 06/20/2016

3.4.3 Other Electrical Specifications

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, T_A=25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units
SPI Operating Frequency, All Registers Read/Write	Low Speed Characterization		100 ±10%		kHz
	High Speed Characterization		1 ±10%		MHz
SPI Operating Frequency, Sensor and Interrupt Registers Read Only			20 ±10%		MHz
I^2C Operating Frequency	All registers, Fast-mode			400	kHz
	All registers, Standard-mode			100	kHz

Table 5 Other Electrical Specifications

3.5 I2C Timing Characterization

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.4V to 3.6V, VDDIO = 1.71 to VDD, T_A=25°C, unless otherwise noted.

Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
I^2C TIMING	**I^2C FAST-MODE**					
f_{SCL}, SCL Clock Frequency				400	kHz	
$t_{HD.STA}$, (Repeated) START Condition Hold Time		0.6			µs	
t_{LOW}, SCL Low Period		1.3			µs	
t_{HIGH}, SCL High Period		0.6			µs	
$t_{SU.STA}$, Repeated START Condition Setup Time		0.6			µs	
$t_{HD.DAT}$, SDA Data Hold Time		0			µs	
$t_{SU.DAT}$, SDA Data Setup Time		100			ns	
t_r, SDA and SCL Rise Time	C_b bus cap. from 10 to 400pF	20+0.1C_b		300	ns	
t_f, SDA and SCL Fall Time	C_b bus cap. from 10 to 400pF	20+0.1C_b		300	ns	
$t_{SU.STO}$, STOP Condition Setup Time		0.6			µs	
t_{BUF}, Bus Free Time Between STOP and START Condition		1.3			µs	
C_b, Capacitive Load for each Bus Line			< 400		pF	
$t_{VD.DAT}$, Data Valid Time				0.9	µs	
$t_{VD.ACK}$, Data Valid Acknowledge Time				0.9	µs	

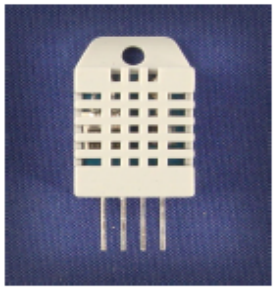
Table 6 I^2C Timing Characteristics

Aosong(Guangzhou) Electronics Co.,Ltd

Tell: +86-020-36380552, +86-020-36042809 Fax: +86-020-36380562
http://www.aosong.com
Email: thomasliu198518@yahoo.com.cn sales@aosong.com
Address: No.56, Renhe Road, Renhe Town, Baiyun District, Guangzhou, China

Digital-output relative humidity & temperature sensor/module

AM2303



Capacitive-type humidity and temperature module/sensor

1. Feature & Application:

* Full range temperature compensated * Relative humidity and temperature measurement
* Calibrated digital signal *Outstanding long-term stability *Extra components not needed
* Long transmission distance * Low power consumption *4 pins packaged and fully interchangeable

2. Description:

AM2303 output calibrated digital signal. It utilizes exclusive digital-signal-collecting-technique and humidity sensing technology, assuring its reliability and stability.Its sensing elements is connected with 8-bit single-chip computer.

Every sensor of this model is temperature compensated and calibrated in accurate calibration chamber and the calibration-coefficient is saved in type of programme in OTP memory, when the sensor is detecting, it will cite coefficient from memory.
Small size & low consumption & long transmission distance(20m) enable AM2303 to be suited in all kinds of harsh application occasions.

Single-row packaged with four pins, making the connection very convenient.

3. Technical Specification:

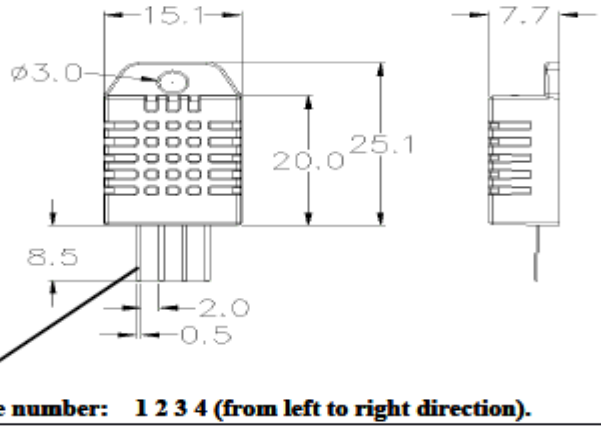
Model	AM2303
Power supply	3.3-6V DC
Output signal	digital signal via single-bus
Sensing element	Polymer humidity capacitor & DS18B20 for detecting temperature
Measuring range	humidity 0-100%RH; temperature -40~125Celsius

Aosong(Guangzhou) Electronics Co.,Ltd

Tell: +86-020-36380552, +86-020-36042809 Fax: +86-020-36380562
http://www.aosong.com
Email: thomasliu198518@yahoo.com.cn sales@aosong.com
Address: No.56, Renhe Road, Renhe Town, Baiyun District, Guangzhou, China

Accuracy	humidity +-2%RH(Max +-5%RH);	temperature +-0.2Celsius
Resolution or sensitivity	humidity 0.1%RH;	temperature 0.1Celsius
Repeatability	humidity +-1%RH;	temperature +-0.2Celsius
Humidity hysteresis	+-0.3%RH	
Long-term Stability	+-0.5%RH/year	
Sensing period	Average: 2s	
Interchangeability	fully interchangeable	

4. Dimensions: (unit----mm)



Pin sequence number: 1 2 3 4 (from left to right direction).

Pin	Function
1	VDD---power supply
2	DATA--signal
3	NULL
4	GND

5. Operating specifications:

(1) Power and Pins

Power's voltage should be 3.3-6V DC. When power is supplied to sensor, don't send any instruction to the sensor within one second to pass unstable status. One capacitor valued 100nF can be added between VDD and GND for wave filtering.

(2) Communication and signal

Single-bus data is used for communication between MCU and AM2303, it costs 5mS for single time communication.

DS18B20

Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

General Description

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

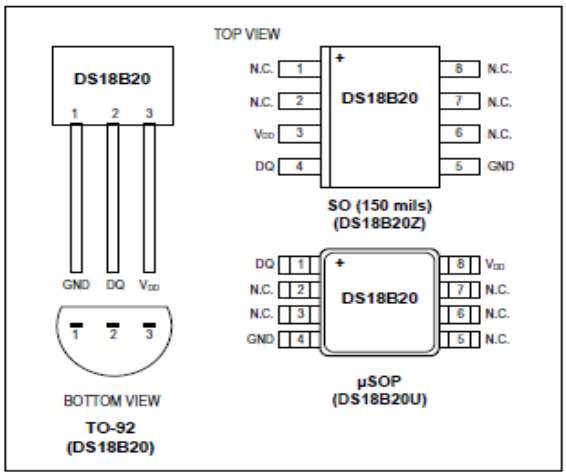
Applications

- Thermostatic Controls
- Industrial Systems
- Consumer Products
- Thermometers
- Thermally Sensitive Systems

Benefits and Features

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Reduce Component Count with Integrated Temperature Sensor and EEPROM
  - Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
  - ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
  - Programmable Resolution from 9 Bits to 12 Bits
  - No External Components Required
- Parasitic Power Mode Requires Only 2 Pins for Operation (DQ and GND)
- Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications with Multidrop Capability
  - Each Device Has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in On-Board ROM
- Flexible User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings with Alarm Search Command Identifies Devices with Temperatures Outside Programmed Limits
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin µSOP, and 3-Pin TO-92 Packages

Pin Configurations



Ordering Information appears at end of data sheet.

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

19-7487; Rev 6; 7/19

maxim integrated

Absolute Maximum Ratings

Voltage Range on Any Pin Relative to Ground ....-0.5V to +6.0V
Operating Temperature Range..... -55°C to +125°C
Storage Temperature Range ..... -55°C to +125°C
Solder Temperature .....Refer to the IPC/JEDEC J-STD-020 Specification.

These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

DC Electrical Characteristics

(-55°C to +125°C; V_{DD} = 3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V_{DD}	Local power (Note 1)		+3.0		+5.5	V
Pullup Supply Voltage	V_{PU}	Parasite power	(Notes 1, 2)	+3.0		+5.5	V
		Local power		+3.0		V_{DD}	
Thermometer Error	t_{ERR}	-10°C to +85°C	(Note 3)			±0.5	°C
		-30°C to +100°C				±1	
		-55°C to +125°C				±2	
Input Logic-Low	V_{IL}	(Notes 1, 4, 5)		-0.3		+0.8	V
Input Logic-High	V_{IH}	Local power	(Notes 1,6)	+2.2		The lower of 5.5 or V_{DD} + 0.3	V
		Parasite power		+3.0			
Sink Current	I_L	$V_{I/O}$ = 0.4V		4.0			mA
Standby Current	I_{DDS}	(Notes 7, 8)			750	1000	nA
Active Current	I_{DD}	V_{DD} = 5V (Note 9)			1	1.5	mA
DQ Input Current	I_{DQ}	(Note 10)			5		µA
Drift		(Note 11)			±0.2		°C

Note 1: All voltages are referenced to ground.
Note 2: The Pullup Supply Voltage specification assumes that the pullup device is ideal, and therefore the high level of the pullup is equal to V_{PU}. In order to meet the V_{IH} spec of the DS18B20, the actual supply rail for the strong pullup transistor must include margin for the voltage drop across the transistor when it is turned on; thus: $V_{PU_ACTUAL} = V_{PU_IDEAL} + V_{TRANSISTOR}$.
Note 3: See typical performance curve in Figure 1. Thermometer Error limits are 3-sigma values.
Note 4: Logic-low voltages are specified at a sink current of 4mA.
Note 5: To guarantee a presence pulse under low voltage parasite power conditions, V_{ILMAX} may have to be reduced to as low as 0.5V.
Note 6: Logic-high voltages are specified at a source current of 1mA.
Note 7: Standby current specified up to +70°C. Standby current typically is 3µA at +125°C.
Note 8: To minimize I_{DDS}, DQ should be within the following ranges: GND ≤ DQ ≤ GND + 0.3V or V_{DD} – 0.3V ≤ DQ ≤ V_{DD}.
Note 9: Active current refers to supply current during active temperature conversions or EEPROM writes.
Note 10: DQ line is high ("high-Z" state).
Note 11: Drift data is based on a 1000-hour stress test at +125°C with V_{DD} = 5.5V.

AC Electrical Characteristics–NV Memory

(-55°C to +125°C; V_{DD} = 3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
NV Write Cycle Time	t_{WR}			2	10	ms
EEPROM Writes	N_{EEWR}	-55°C to +55°C	50k			writes
EEPROM Data Retention	t_{EEDR}	-55°C to +55°C	10			years

AC Electrical Characteristics

(-55°C to +125°C; V_{DD} = 3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Temperature Conversion Time	t_{CONV}	9-bit resolution	(Note 12)			93.75	ms
		10-bit resolution				187.5	
		11-bit resolution				375	
		12-bit resolution				750	
Time to Strong Pullup On	t_{SPON}	Start convert T command issued				10	µs
Time Slot	t_{SLOT}	(Note 12)		60		120	µs
Recovery Time	t_{REC}	(Note 12)		1			µs
Write 0 Low Time	t_{LOW0}	(Note 12)		60		120	µs
Write 1 Low Time	t_{LOW1}	(Note 12)		1		15	µs
Read Data Valid	t_{RDV}	(Note 12)				15	µs
Reset Time High	t_{RSTH}	(Note 12)		480			µs
Reset Time Low	t_{RSTL}	(Notes 12, 13)		480			µs
Presence-Detect High	t_{PDHIGH}	(Note 12)		15		60	µs
Presence-Detect Low	t_{PDLOW}	(Note 12)		60		240	µs
Capacitance	$C_{IN/OUT}$					25	pF

Note 12: See the timing diagrams in Figure 2.
Note 13: Under parasite power, if t_{RSTL} > 960µs, a power-on reset can occur.

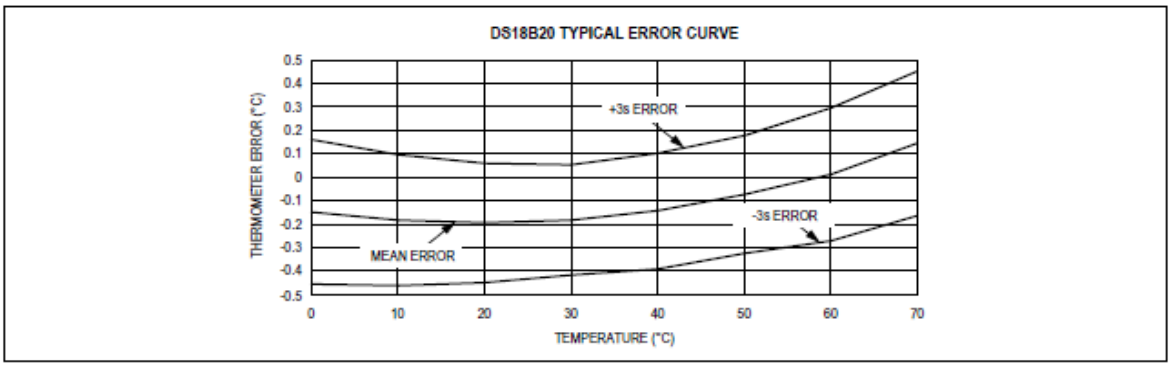


Figure 1. Typical Performance Curve

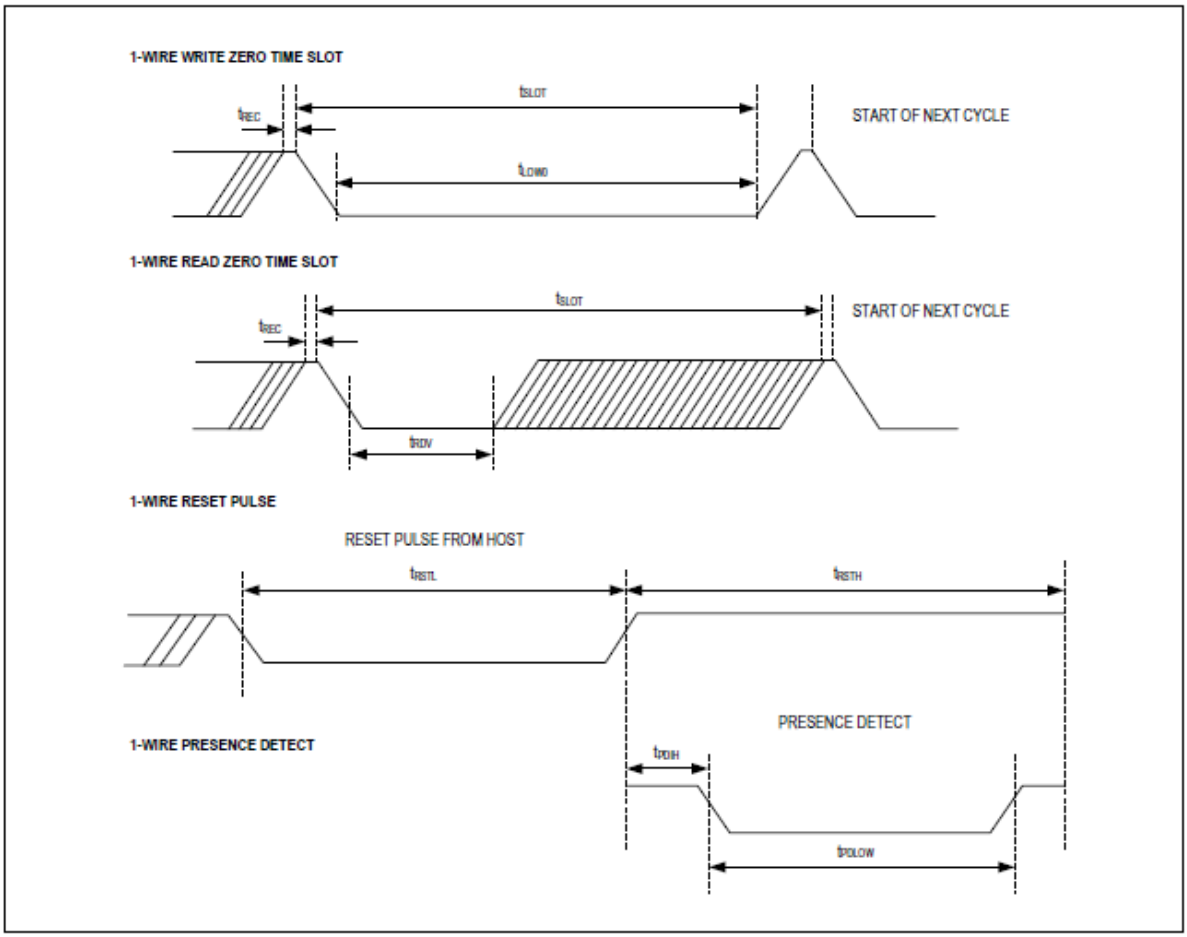


Figure 2. Timing Diagrams

Pin Description

PIN			NAME	FUNCTION
SO	µSOP	TO-92		
1, 2, 6, 7, 8	2, 3, 5, 6, 7	—	N.C.	No Connection
3	8	3	V_{DD}	Optional V_{DD}. V_{DD} must be grounded for operation in parasite power mode.
4	1	2	DQ	Data Input/Output. Open-drain 1-Wire interface pin. Also provides power to the device when used in parasite power mode (see the *Powering the DS18B20* section.)
5	4	1	GND	Ground

BMP280
Digital Pressure Sensor

Key parameters

• Pressure range	300 ... 1100 hPa (equiv. to +9000...-500 m above/below sea level)
• Package	8-pin LGA metal-lid Footprint : 2.0 × 2.5 mm², height: 0.95 mm
• Relative accuracy (700 ... 900hPa @25°C)	±0.12 hPa, equiv. to ±1 m
• Absolute accuracy (950 ...1050 hPa, 0 ...+40 °C)	typ. ±1 hPa
• Temperature coefficient offset (25 ... 40°C @900hPa)	1.5 Pa/K, equiv. to 12.6 cm/K
• Digital interfaces	I²C (up to 3.4 MHz) SPI (3 and 4 wire, up to 10 MHz)
• Current consumption	2.7µA @ 1 Hz sampling rate
• Temperature range	-40 ... +85 °C
• RoHS compliant, halogen-free	
• MSL 1	

Typical applications

- Enhancement of GPS navigation
  (e.g. time-to-first-fix improvement, dead-reckoning, slope detection)
- Indoor navigation (floor detection, elevator detection)
- Outdoor navigation, leisure and sports applications
- Weather forecast
- Vertical velocity indication (e.g. rise/sink speed)

Target devices

- Handsets such as mobile phones, tablet PCs, GPS devices
- Navigation systems
- Home weather stations
- Flying toys
- Watches

General Description

Robert Bosch is the world market leader for pressure sensors in automotive and consumer applications. Bosch's proprietary APSM (Advanced Porous Silicon Membrane) MEMS manufacturing process is fully CMOS compatible and allows a hermetic sealing of the cavity in an all silicon process. The BMP280 is based on Bosch's proven Piezo-resistive pressure sensor technology featuring high EMC robustness, high accuracy and linearity and long term stability.

The BMP280 is an absolute barometric pressure sensor especially designed for mobile applications. The sensor module is housed in an extremely compact 8-pin metal-lid LGA package with a footprint of only 2.0 × 2.5 mm² and 0.95 mm package height. Its small dimensions and its low power consumption of 2.7 µA @1Hz allow the implementation in battery driven devices such as mobile phones, GPS modules or watches.

As the successor to the widely adopted BMP180, the BMP280 delivers high performance in all applications that require precise pressure measurement. The BMP280 operates at lower noise, supports new filter modes and an SPI interface within a footprint 63% smaller than the BMP180.

The emerging applications of indoor navigation, fitness as well as GPS refinement require a high relative accuracy and a low TCO at the same time. BMP180 and BMP280 are perfectly suitable for applications like floor detection since both sensors feature excellent relative accuracy is ±0.12 hPa, which is equivalent to ±1 m difference in altitude. The very low offset temperature coefficient (TCO) of 1.5 Pa/K translates to a temperature drift of only 12.6 cm/K.
Please contact your regional Bosch Sensortec partner for more information about software packages enhancing the calculation of the altitude given by the BMP280 pressure reading.

Table 1: Comparison between BMP180 and BMP280

Parameter	BMP180	BMP280
Footprint	3.6 × 3.8 mm	2.0 × 2.5 mm
Minimum V_{DD}	1.80 V	1.71 V
Minimum V_{DDIO}	1.62 V	1.20 V
Current consumption @3 Pa RMS noise	12 µA	2.7 µA
RMS Noise	3 Pa	1.3 Pa
Pressure resolution	1 Pa	0.16 Pa
Temperature resolution	0.1°C	0.01°C
Interfaces	I²C	I²C & SPI (3 and 4 wire, mode '00' and '11')
Measurement modes	Only P or T, forced	P&T, forced or periodic
Measurement rate	up to 120 Hz	up to 157 Hz
Filter options	None	Five bandwidths

1. Specification

If not stated otherwise,

- All values are valid over the full voltage range
- All minimum/maximum values are given for the full accuracy temperature range
- Minimum/maximum values of drifts, offsets and temperature coefficients are ±3σ values over lifetime
- Typical values of currents and state machine timings are determined at 25 °C
- Minimum/maximum values of currents are determined using corner lots over complete temperature range
- Minimum/maximum values of state machine timings are determined using corner lots over 0...+65 °C temperature range

The specification tables are split into pressure and temperature part of BMP280.

Table 2: Parameter specification

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Operating temperature range	T_A	operational	-40	25	+85	°C
		full accuracy	0		+65	
Operating pressure range	P	full accuracy	300		1100	hPa
Sensor supply voltage	V_{DD}	ripple max. 50mVpp	1.71	1.8	3.6	V
Interface supply voltage	V_{DDIO}		1.2	1.8	3.6	V
Supply current	$I_{DD,LP}$	1 Hz forced mode, pressure and temperature, lowest power		2.8	4.2	µA
Peak current	I_{peak}	during pressure measurement		720	1120	µA
Current at temperature measurement	I_{DDT}			325		µA
Sleep current[1]	I_{DDSL}	25 °C		0.1	0.3	µA
Standby current (inactive period of normal mode) [2]	I_{DDSB}	25 °C		0.2	0.5	µA
Relative accuracy pressure V_{DD} = 3.3V	A_{rel}	700 ... 900hPa 25 . . . 40 °C		±0.12		hPa
				±1.0		m
Offset temperature coefficient	TCO	900hPa 25 . . . 40 °C		±1.5		Pa/K
				12.6		cm/K

Absolute accuracy pressure	A^P_{ext}	300 . . 1100 hPa -20 . . . 0 °C		±1.7		hPa
	A^P_{full}	300 . . . 1100 hPa 0 . . . 65 °C		±1.0		hPa
Resolution of output data in ultra high resolution mode	R^P	Pressure		0.0016		hPa
	R^T	Temperature		0.01		°C
Noise in pressure	$V_{p,full}$	Full bandwidth, ultra high resolution See chapter 3.5		1.3		Pa
				11		cm
	$V_{p,filtered}$	Lowest bandwidth, ultra high resolution See chapter 3.5		0.2		Pa
				1.7		cm
Absolute accuracy temperature[3]	A^T	@ 25 °C		±0.5		°C
		0 . . . +65 °C		±1.0		°C
PSRR (DC)	PSRR	full V_{DD} range			±0.005	Pa/ mV
Long term stability[4]	ΔP_{stab}	12 months		±1.0		hPa
Solder drifts		Minimum solder height 50 µm	-0.5		+2	hPa
Start-up time	$t_{startup}$	Time to first communication after both V_{DD} > 1.58V and V_{DDIO} > 0.65V			2	ms
Possible sampling rate	f_{sample}	*osrs t = osrs p* = 1; See chapter 3.8	157	182	tbd[5]	Hz
Standby time accuracy	$\Delta t_{standby}$			±5	±25	%

2. Absolute maximum ratings

The absolute maximum ratings are provided in Table 3.

Table 3: Absolute maximum ratings

Parameter	Condition	Min	Max	Unit
Voltage at any supply pin	V_{DD} and V_{DDIO} Pin	-0.3	4.25	V
Voltage at any interface pin		-0.3	V_{DDIO} + 0.3	V
Storage Temperature	≤ 65% rel. H.	-45	+85	°C
Pressure		0	20 000	hPa
ESD	HBM, at any Pin		±2	kV
	CDM		±500	V
	Machine model		±200	V

3. Functional description

The BMP280 consists of a Piezo-resistive pressure sensing element and a mixed-signal ASIC. The ASIC performs A/D conversions and provides the conversion results and sensor specific compensation data through a digital interface.

BMP280 provides highest flexibility to the designer and can be adapted to the requirements regarding accuracy, measurement time and power consumption by selecting from a high number of possible combinations of the sensor settings.

BMP280 can be operated in three power modes (see chapter 3.6):

- sleep mode
- normal mode
- forced mode

In sleep mode, no measurements are performed. Normal mode comprises an automated perpetual cycling between an active measurement period and an inactive standby period. In forced mode, a single measurement is performed. When the measurement is finished, the sensor returns to sleep mode.

A set of oversampling settings is available ranging from ultra low power to ultra high resolution setting in order to adapt the sensor to the target application. The settings are predefined combinations of pressure measurement oversampling and temperature measurement oversampling. Pressure and temperature measurement oversampling can be selected independently from 0 to 16 times oversampling (see chapter 3.3.1 and 3.3.2):

- Temperature measurement
- Ultra low power
- Low power
- Standard resolution
- High resolution
- Ultra high resolution

BMP280 is equipped with a built-in IIR filter in order to minimize short-term disturbances in the output data caused by the slamming of a door or window. The filter coefficient ranges from 0 (off) to 16.

In order to simplify the device usage and reduce the high number of possible combinations of power modes, oversampling rates and filter settings, Bosch Sensortec provides a proven set of recommendations for common use-cases in smart-phones, mobile weather stations or flying toys (see chapter 3.3):

- Handheld device low-power (e.g. smart phones running Android)
- Handheld device dynamic (e.g. smart phones running Android)
- Weather monitoring (setting with lowest power consumption)
- Elevator / floor change detection
- Drop detection
- Indoor navigation

ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I²C-Compatible, 860SPS, 16-Bit ADCs with Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator

1 Features

- Ultra-small packages:
  - X2QFN: 2mm × 1.5mm × 0.4mm
  - SOT: 2.9mm × 2.8mm × 0.6mm
- Wide supply range: 2.0V to 5.5V
- Low current consumption: 150µA (continuous-conversion mode)
- Programmable data rate: 8SPS to 860SPS
- Single-cycle settling
- Internal low-drift voltage reference
- Internal oscillator
- I²C interface: four pin-selectable addresses
- Operating temperature range: –40°C to +125°C
- Family of devices:
  - ADS1113: one single-ended (SE) or differential (DE) input
  - ADS1114: one single-ended or differential input with comparator and PGA
  - ADS1115: four single-ended or two differential inputs with comparator and PGA

2 Applications

- Portable instrumentation
- Battery voltage and current monitoring
- Temperature measurement systems
- Consumer electronics
- Factory automation and process control

3 Description

The ADS1113, ADS1114, and ADS1115 (ADS111x) are precision, low-power, 16-bit, I²C-compatible, analog-to-digital converters (ADCs) offered in a leadless X2QFN-10, a SOT-10 package, and a VSSOP-10 package. The ADS111x devices incorporate a low-drift voltage reference and an oscillator. The ADS1114 and ADS1115 also incorporate a programmable gain amplifier (PGA) and a digital comparator. These features, along with a wide operating supply range, are useful for power- and space-constrained, sensor measurement applications.

The ADS111x devices perform conversions at data rates of up to 860 samples per second (SPS). The PGA offers input ranges from ±256mV to ±6.144V, allowing precise large- and small-signal measurements. The ADS1115 features an input multiplexer (MUX) that allows two differential or four single-ended input measurements. Use the digital comparator in the ADS1114 and ADS1115 for undervoltage and overvoltage detection.

Package Information

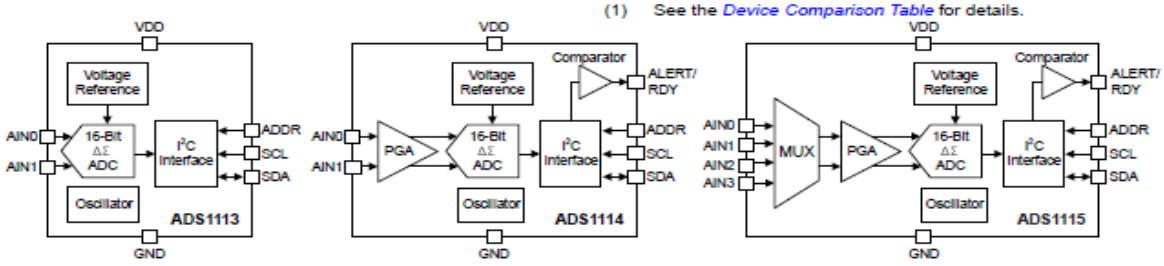
PART NUMBER	PACKAGE(1)	PACKAGE SIZE(2)
ADS111x	RUG (X2QFN, 10)	1.50mm × 2.00mm
	DYN (SOT, 10)	2.90mm × 2.80mm
	DGS (VSSOP, 10)	3.00mm × 4.90mm

(1) For more information, see Section 14.
(2) The package size (length × width) is a nominal value and includes pins, where applicable.

Device Information

PART NUMBER	INPUT CHANNELS	FEATURES(1)
ADS1113	1 DE (1 SE)	—
ADS1114	1 DE (1 SE)	PGA, comparator
ADS1115	2 DE (4 SE)	PGA, comparator

(1) See the *Device Comparison Table* for details.



Simplified Block Diagrams

Device Comparison Table

DEVICE	RESOLUTION (Bits)	MAXIMUM SAMPLE RATE (SPS)	INPUT CHANNELS Differential (Single-Ended)	PGA	INTERFACE	SPECIAL FEATURES
ADS1115	16	860	2 (4)	Yes	I²C	Comparator
ADS1114	16	860	1 (1)	Yes	I²C	Comparator
ADS1113	16	860	1(1)	No	I²C	None
ADS1015	12	3300	2 (4)	Yes	I²C	Comparator
ADS1014	12	3300	1 (1)	Yes	I²C	Comparator
ADS1013	12	3300	1 (1)	No	I²C	None
ADS1118	16	860	2 (4)	Yes	SPI	Temperature sensor
ADS1018	12	3300	2 (4)	Yes	SPI	Temperature sensor

4 Pin Configuration and Functions

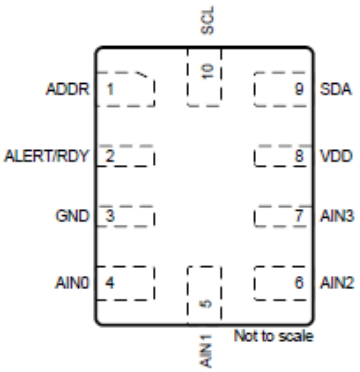


Figure 4-1. RUG Package, 10-Pin (Top View)

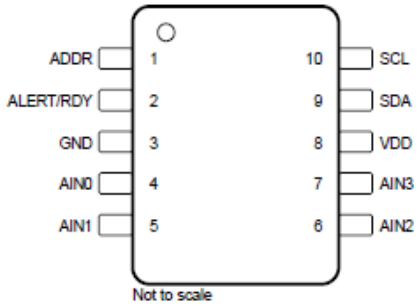


Figure 4-2. DYN and DGS Packages, 10-Pin (Top View)

Table 4-1. Pin Functions: RUG, DYN, and DGS Packages

PIN				TYPE	DESCRIPTION(1)
NAME	ADS1113	ADS1114	ADS1115		
ADDR	1	1	1	Digital input	I²C target address select
AIN0	4	4	4	Analog input	Analog input 0
AIN1	5	5	5	Analog input	Analog input 1
AIN2	—	—	6	Analog input	Analog input 2 (ADS1115 only)
AIN3	—	—	7	Analog input	Analog input 3 (ADS1115 only)
ALERT/RDY	—	2	2	Digital output	Comparator output or conversion ready (ADS1114 and ADS1115 only). Open-drain output. Connect to VDD using a pullup resistor.
GND	3	3	3	Analog	Ground
NC	2, 6, 7	6, 7	—	—	No connect. Leave the pin floating or connect to GND.
SCL	10	10	10	Digital input	Serial clock input. Connect to VDD using a pullup resistor.
SDA	9	9	9	Digital I/O	Serial data input and output. Connect to VDD using a pullup resistor.
VDD	8	8	8	Analog	Power supply. Connect a 0.1µF, power-supply decoupling capacitor to GND.

(1) See the *Unused Inputs and Outputs* section for unused pin connections.

5 Specifications

5.1 Absolute Maximum Ratings

over operating ambient temperature range (unless otherwise noted)(1)

		MIN	MAX	UNIT
Power-supply voltage	VDD to GND	–0.3	7	V
Analog input voltage	AIN0, AIN1, AIN2, AIN3	GND – 0.3	VDD + 0.3	V
Digital input voltage	SDA, SCL, ADDR, ALERT/RDY	GND – 0.3	5.5	V
Input current, continuous	Any pin except power supply pins	–10	10	mA
Temperature	Operating ambient, T_A	–40	125	°C
	Junction, T_J	–40	150	
	Storage, T_{stg}	–60	150	

(1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

5.2 ESD Ratings

			VALUE	UNIT
$V_{(ESD)}$	Electrostatic discharge	Human-body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001(1)	±2000	V
		Charged-device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101(2)	±500	

(1) JEDEC document JEP155 states that 500V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.
(2) JEDEC document JEP157 states that 250V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

5.3 Recommended Operating Conditions

		MIN	NOM	MAX	UNIT
POWER SUPPLY					
	Power supply (VDD to GND)	2		5.5	V
ANALOG INPUTS(1)					
FSR	Full-scale input voltage range(2) ($V_{IN} = V_{(AINP)} – V_{(AINN)}$)	±0.256		±6.144	V
$V_{(AINx)}$	Absolute input voltage	GND		VDD	V
DIGITAL INPUTS					
V_{DIG}	Digital input voltage	GND		5.5	V
TEMPERATURE					
T_A	Operating ambient temperature	–40		125	°C

(1) AINP and AINN denote the selected positive and negative inputs. AINx denotes one of the four available analog inputs.
(2) This parameter expresses the full-scale range of the ADC scaling. No more than VDD + 0.3V must be applied to the analog inputs of the device. See Table 7-1 for more information.

5.4 Thermal Information

THERMAL METRIC(1)		RUG (X2QFN) 10 PINS	DYN (SOT) 10 PINS	DGS (VSSOP) 10 PINS	UNIT
$R_{\theta JA}$	Junction-to-ambient thermal resistance	245.2	147.1	182.7	°C/W
$R_{\theta JC(top)}$	Junction-to-case (top) thermal resistance	69.3	59.3	67.2	°C/W
$R_{\theta JB}$	Junction-to-board thermal resistance	172.0	71.3	103.8	°C/W
ψ_{JT}	Junction-to-top characterization parameter	8.2	2.8	10.2	°C/W
ψ_{JB}	Junction-to-board characterization parameter	170.8	70.4	102.1	°C/W
$R_{\theta JC(bot)}$	Junction-to-case (bottom) thermal resistance	N/A	N/A	N/A	°C/W

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *Semiconductor and IC Package Thermal Metrics* application note.

5.5 Electrical Characteristics

at VDD = 3.3V, data rate = 8SPS, and full-scale input voltage range (FSR) = ±2.048V (unless otherwise noted); maximum and minimum specifications apply from T_A = –40°C to +125°C; typical specifications are at T_A = 25°C

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
ANALOG INPUT						
	Common-mode input impedance	FSR = ±6.144V(1)		10		MΩ
		FSR = ±4.096V(1), FSR = ±2.048V		6		
		FSR = ±1.024V		3		
		FSR = ±0.512V, FSR = ±0.256V		100		
	Differential input impedance	FSR = ±6.144V(1)		22		MΩ
		FSR = ±4.096V(1)		15		
		FSR = ±2.048V		4.9		
		FSR = ±1.024V		2.4		
		FSR = ±0.512V, ±0.256V		710		kΩ
SYSTEM PERFORMANCE						
	Resolution (no missing codes)		16			Bits
DR	Data rate		8, 16, 32, 64, 128, 250, 475, 860			SPS
	Data rate variation	All data rates	–10%		10%	
	Output noise		See *Noise Performance* section			
INL	Integral nonlinearity	DR = 8SPS, FSR = ±2.048V(2)			1	LSB
	Offset error	FSR = ±2.048V, differential inputs	–3	±1	3	LSB
		FSR = ±2.048V, single-ended inputs		±3		
	Offset drift over temperature	FSR = ±2.048V		0.005		LSB/°C
	Long-term Offset drift	FSR = ±2.048V, T_A = 125°C, 1000 hours		±1		LSB
	Offset power-supply rejection	FSR = ±2.048V, DC supply variation		1		LSB/V
	Offset channel match	Match between any two inputs		3		LSB
	Gain error(3)	FSR = ±2.048V, T_A = 25°C		0.01%	0.15%	
	Gain drift over temperature(3)	FSR = ±0.256V		7		ppm/°C
		FSR = ±2.048V		5	40	
		FSR = ±6.144V(1)		5		
	Long-term gain drift(3)	FSR = ±2.048V, T_A = 125°C, 1000 hours		±0.05%		
	Gain power-supply rejection			80		ppm/V
	Gain match(3)	Match between any two gains		0.02%	0.1%	
	Gain channel match	Match between any two inputs		0.05%	0.1%	
CMRR	Common-mode rejection ratio	At DC, FSR = ±0.256V		105		dB
		At DC, FSR = ±2.048V		100		
		At DC, FSR = ±6.144V(1)		90		
		f_{CM} = 60Hz, DR = 8SPS		105		
		f_{CM} = 50Hz, DR = 8SPS		105		
DIGITAL INPUT/OUTPUT						
V_{IH}	High-level input voltage		0.7 VDD		5.5	V
V_{IL}	Low-level input voltage		GND		0.3 VDD	V
V_{OL}	Low-level output voltage	I_{OL} = 3mA	GND	0.15	0.4	V
	Input leakage current	GND < V_{DIG} < VDD	–10		10	µA

5.5 Electrical Characteristics (continued)

at VDD = 3.3V, data rate = 8SPS, and full-scale input voltage range (FSR) = ±2.048V (unless otherwise noted); maximum and minimum specifications apply from T_A = –40°C to +125°C; typical specifications are at T_A = 25°C

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
POWER-SUPPLY							
I_{VDD}	Supply current	Power-down	T_A = 25°C		0.5	2	µA
						5	
		Operating	T_A = 25°C		150	200	
						300	
P_D	Power dissipation	VDD = 5.0V			0.9		mW
		VDD = 3.3 V			0.5		
		VDD = 2.0V			0.3		

(1) This parameter expresses the full-scale range of the ADC scaling. No more than VDD + 0.3V must be applied to the analog inputs of the device. See Table 7-1 for more information.
(2) Best-fit INL; covers 99% of full-scale
(3) Includes all errors from onboard PGA and voltage reference

5.6 Timing Requirements: I²C

over operating ambient temperature range and VDD = 2.0V to 5.5V (unless otherwise noted)

		FAST MODE		HIGH-SPEED MODE		UNIT
		MIN	MAX	MIN	MAX	
f_{SCL}	SCL clock frequency	0.01	0.4	0.01	3.4	MHz
t_{BUF}	Bus free time between START and STOP condition	600		160		ns
t_{HDSTA}	Hold time after repeated START condition. After this period, the first clock is generated.	600		160		ns
t_{SUSTA}	Setup time for a repeated START condition	600		160		ns
t_{SUSTO}	Setup time for STOP condition	600		160		ns
t_{HDDAT}	Data hold time	0		0		ns
t_{SUDAT}	Data setup time	100		10		ns
t_{LOW}	Low period of the SCL clock pin	1300		160		ns
t_{HIGH}	High period for the SCL clock pin	600		60		ns
t_F	Fall time for both SDA and SCL signals(1)		300		160	ns
t_R	Rise time for both SDA and SCL signals(1)		300		160	ns

(1) For high-speed mode maximum values, the capacitive load on the bus line must not exceed 400pF.

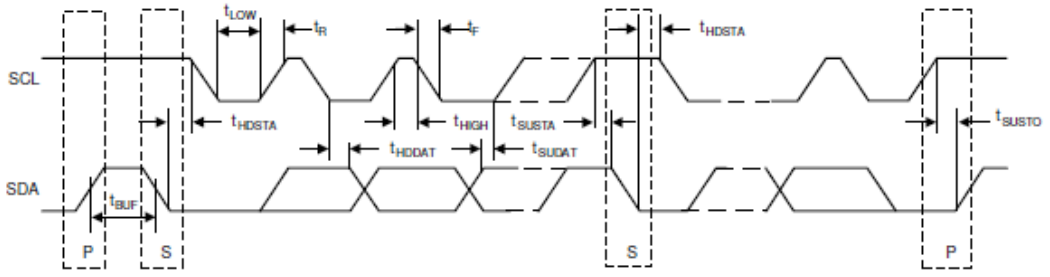


Figure 5-1. I²C Interface Timing

SOLOMON SYSTECH
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

SSD1306

Advance Information

128 x 64 Dot Matrix
OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller

1 GENERAL DESCRIPTION

SSD1306 is a single-chip CMOS OLED/PLED driver with controller for organic / polymer light emitting diode dot-matrix graphic display system. It consists of 128 segments and 64commons. This IC is designed for Common Cathode type OLED panel.

The SSD1306 embeds with contrast control, display RAM and oscillator, which reduces the number of external components and power consumption. It has 256-step brightness control. Data/Commands are sent from general MCU through the hardware selectable 6800/8000 series compatible Parallel Interface, I^2C interface or Serial Peripheral Interface. It is suitable for many compact portable applications, such as mobile phone sub-display, MP3 player and calculator, etc.

2 FEATURES

- Resolution: 128 x 64 dot matrix panel
- Power supply
  - V_{DD} = 1.65V to 3.3V for IC logic
  - V_{CC} = 7V to 15V for Panel driving
- For matrix display
  - OLED driving output voltage, 15V maximum
  - Segment maximum source current: 100uA
  - Common maximum sink current: 15mA
  - 256 step contrast brightness current control
- Embedded 128 x 64 bit SRAM display buffer
- Pin selectable MCU Interfaces:
  - 8-bit 6800/8080-series parallel interface
  - 3 /4 wire Serial Peripheral Interface
  - I^2C Interface
- Screen saving continuous scrolling function in both horizontal and vertical direction
- RAM write synchronization signal
- Programmable Frame Rate and Multiplexing Ratio
- Row Re-mapping and Column Re-mapping
- On-Chip Oscillator
- Chip layout for COG & COF
- Wide range of operating temperature: -40°C to 85°C

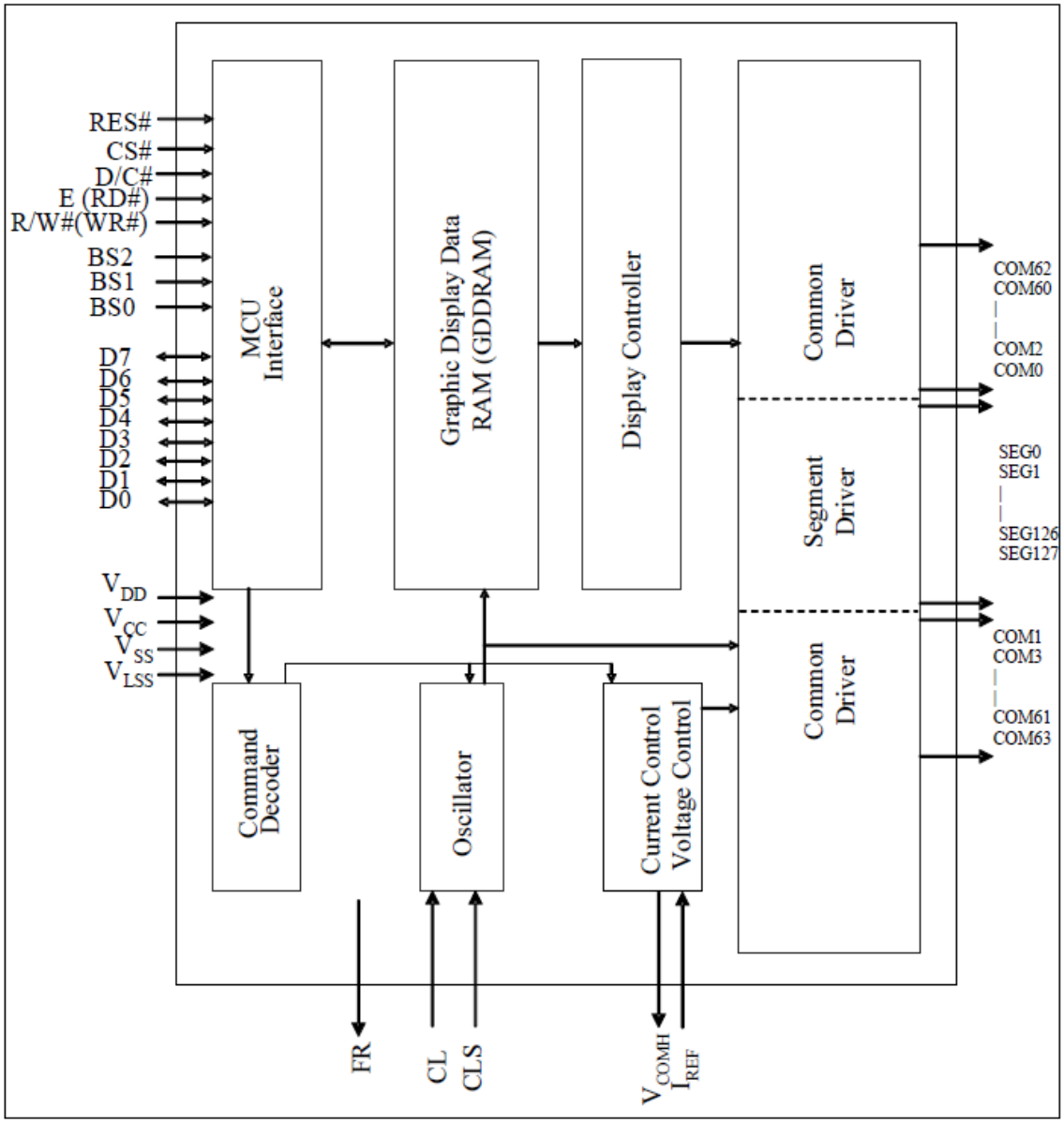
3 ORDERING INFORMATION

Table 3-1: Ordering Information

Ordering Part Number	SEG	COM	Package Form	Reference	Remark
SSD1306Z	128	64	COG	8	o Min SEG pad pitch : 47um o Min COM pad pitch : 40um o Die thickness: 300 +/- 25um
SSD1306TR1	104	48	TAB	11, 56	o 35mm film, 4 sprocket hole, Folding TAB o 8-bit 80 / 8-bit 68 / SPI / I^2C interface o SEG, COM lead pitch 0.1mm x 0.997 =0.0997mm o Die thickness: 457 +/- 25um

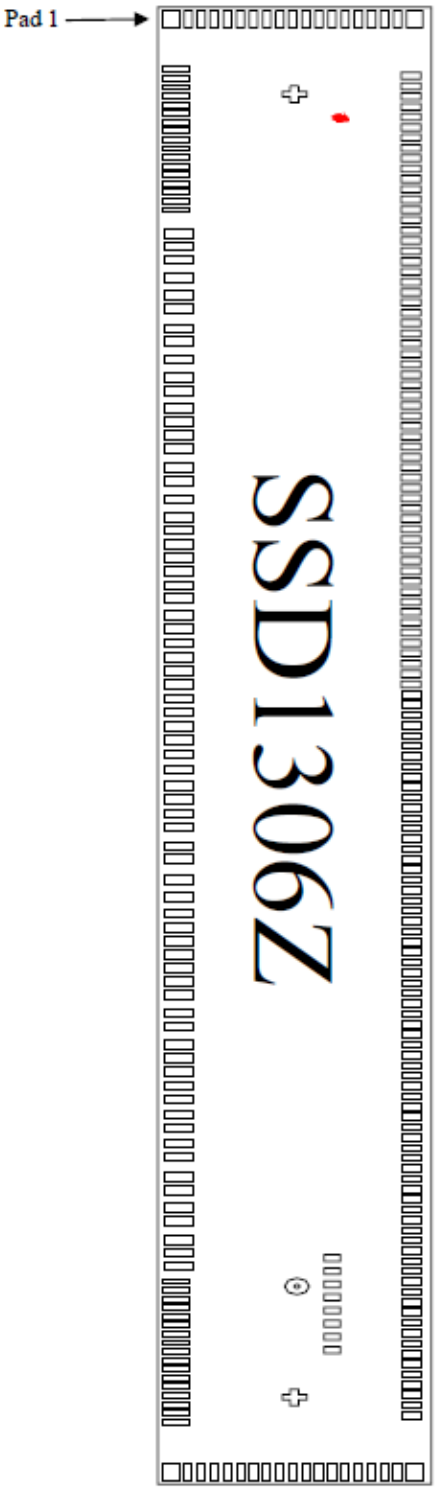
4 BLOCK DIAGRAM

Figure 4-1 SSD1306 Block Diagram



5 DIE PAD FLOOR PLAN

Figure 5-1 : SSD1306Z Die Drawing



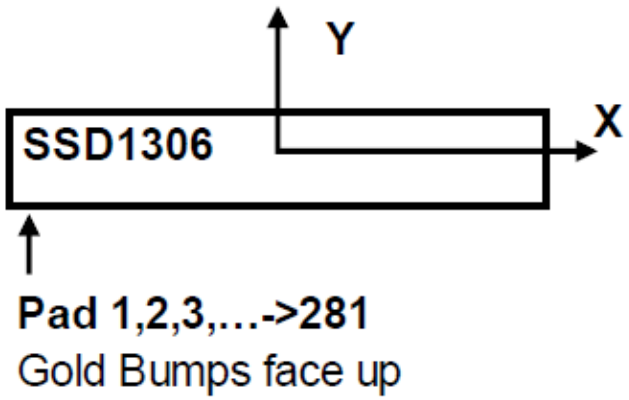
Die size	6.76mm x 0.86mm
Die thickness	300 +/- 25um
Min I/O pad pitch	60um
Min SEG pad pitch	47um
Min COM pad pitch	40um
Bump height	Nominal 15um

Bump size	
Pad 1, 106, 124, 256	80um x 50um
Pad 2-18, 89-105, 107-123, 257-273	25ium x 80um
Pad 19-88	40um x 89um
Pad 125-255	31um x 59um
Pad 274-281 (TR pads)	30um x 50um

Alignment mark	Position	Size
+ shape	(-2973, 0)	75um x 75um
+ shape	(2973, 0)	75um x 75um
Circle	(2466.665, 7.575)	R37.5um, inner 18um
SSL Logo	(-2862.35, 144.82)	-

(For details dimension please see p.9)

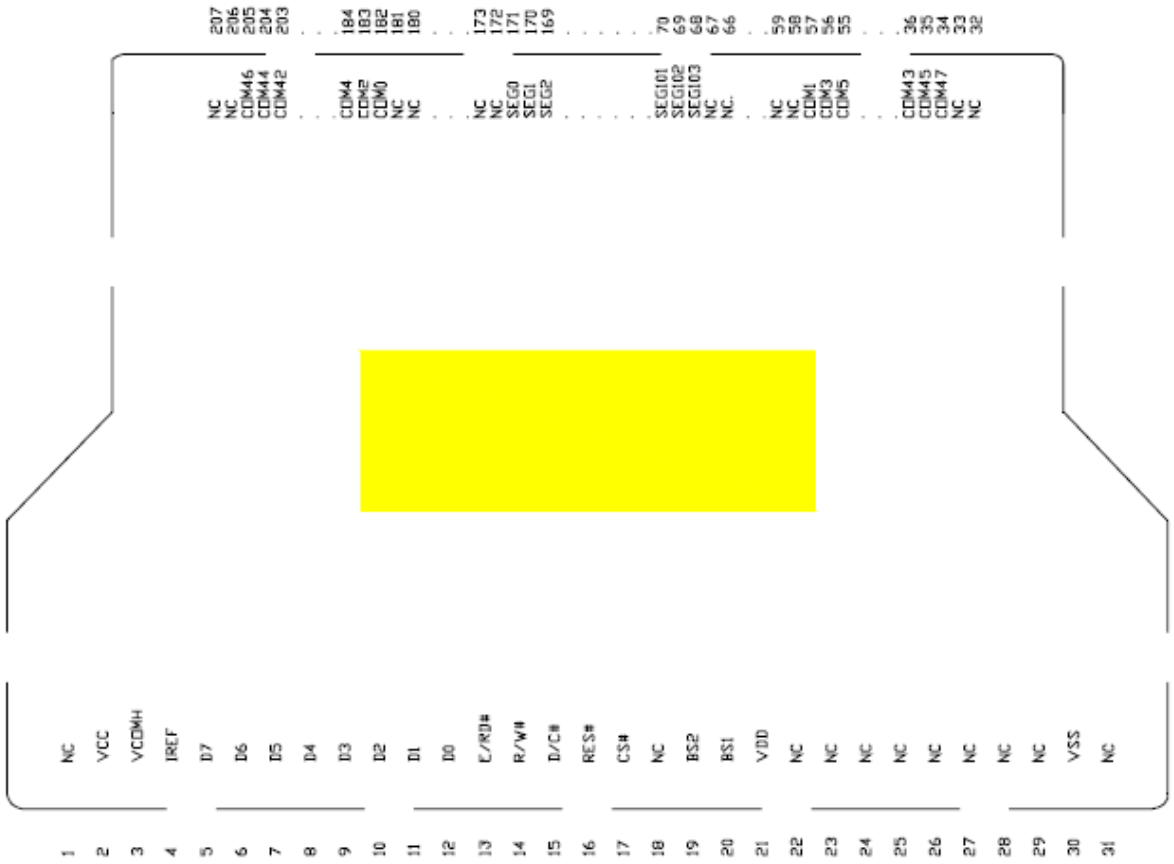
Note
(1) Diagram showing the Gold bumps face up.
(2) Coordinates are referenced to center of the chip.
(3) Coordinate units and size of all alignment marks are in um.
(4) All alignment keys do not contain gold



6 PIN ARRANGEMENT

6.1 SSD1306TR1 pin assignment

Figure 6-1 : SSD1306TR1 Pin Assignment



Note:
(1) COM sequence (Split) is under command setting: DAh, 12h

7 PIN DESCRIPTION

Key:

I = Input	NC = Not Connected
O =Output	Pull LOW= connect to Ground
I/O = Bi-directional (input/output)	Pull HIGH= connect to V_{DD}
P = Power pin	

Figure 7-1 Pin Description

Pin Name	Type	Description
V_{DD}	P	Power supply pin for core logic operation.
V_{CC}	P	Power supply for panel driving voltage. This is also the most positive power voltage supply pin.
V_{SS}	P	This is a ground pin.
V_{LSS}	P	This is an analog ground pin. It should be connected to V_{SS} externally.
V_{COMH}	O	The pin for COM signal deselected voltage level. A capacitor should be connected between this pin and V_{SS}.
V_{BAT}	P	Reserved pin. It should be connected to V_{DD}.
BGGND	P	Reserved pin. It should be connected to ground.
C1P/C1N C2P/C2N	I	Reserved pin. It should be kept NC.
V_{BREF}	P	Reserved pin. It should be kept NC.
BS[2:0]	I	MCU bus interface selection pins. Please refer to **Table 7-1** for the details of setting.
I_{REF}	I	This is segment output current reference pin. A resistor should be connected between this pin and V_{SS} to maintain the I_{REF} current at 12.5 uA. Please refer to **Figure 8-15** for the details of resistor value.
FR	O	This pin outputs RAM write synchronization signal. Proper timing between MCU data writing and frame display timing can be achieved to prevent tearing effect. It should be kept NC if it is not used. Please refer to Section **8.4** for details usage.
CL	I	This is external clock input pin. When internal clock is enabled (i.e. HIGH in CLS pin), this pin is not used and should be connected to V_{SS}. When internal clock is disabled (i.e. LOW in CLS pin), this pin is the external clock source input pin.
CLS	I	This is internal clock enable pin. When it is pulled HIGH (i.e. connect to V_{DD}), internal clock is enabled. When it is pulled LOW, the internal clock is disabled; an external clock source must be connected to the CL pin for normal operation.
RES#	I	This pin is reset signal input. When the pin is pulled LOW, initialization of the chip is executed. Keep this pin HIGH (i.e. connect to V_{DD}) during normal operation.
CS#	I	This pin is the chip select input. (active LOW).

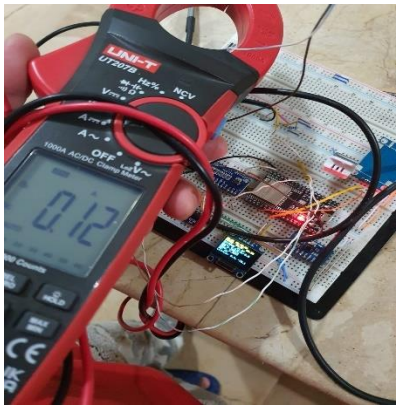
Pin Name	Type	Description
D/C#	I	This is Data/Command control pin. When it is pulled HIGH (i.e. connect to V_{DD}), the data at D[7:0] is treated as data. When it is pulled LOW, the data at D[7:0] will be transferred to the command register. In I^2C mode, this pin acts as SA0 for slave address selection. When 3-wire serial interface is selected, this pin must be connected to V_{SS}. For detail relationship to MCU interface signals, please refer to the Timing Characteristics Diagrams: **Figure 13-1** to **Figure 13-5**.
E (RD#)	I	When interfacing to a 6800-series microprocessor, this pin will be used as the Enable (E) signal. Read/write operation is initiated when this pin is pulled HIGH (i.e. connect to V_{DD}) and the chip is selected. When connecting to an 8080-series microprocessor, this pin receives the Read (RD#) signal. Read operation is initiated when this pin is pulled LOW and the chip is selected. When serial or I^2C interface is selected, this pin must be connected to V_{SS}.
R/W#(WR#)	I	This is read / write control input pin connecting to the MCU interface. When interfacing to a 6800-series microprocessor, this pin will be used as Read/Write (R/W#) selection input. Read mode will be carried out when this pin is pulled HIGH (i.e. connect to V_{DD}) and write mode when LOW. When 8080 interface mode is selected, this pin will be the Write (WR#) input. Data write operation is initiated when this pin is pulled LOW and the chip is selected. When serial or I^2C interface is selected, this pin must be connected to V_{SS}.
D[7:0]	IO	These are 8-bit bi-directional data bus to be connected to the microprocessor's data bus. When serial interface mode is selected, D0 will be the serial clock input: SCLK; D1 will be the serial data input: SDIN and D2 should be kept NC. When I^2C mode is selected, D2, D1 should be tied together and serve as SDA_{out}, SDA_{in} in application and D0 is the serial clock input, SCL.
TR0-TR6	-	Testing reserved pins. It should be kept NC.
SEG0 ~ SEG127	O	These pins provide Segment switch signals to OLED panel. These pins are V_{SS} state when display is OFF.
COM0 ~ COM63	O	These pins provide Common switch signals to OLED panel. They are in high impedance state when display is OFF.
NC	-	This is dummy pin. Do not group or short NC pins together.

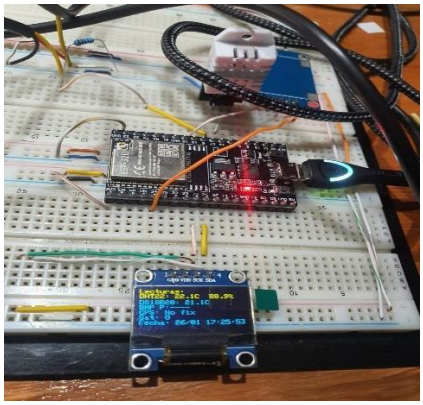
Table 7-1 : MCU Bus Interface Pin Selection

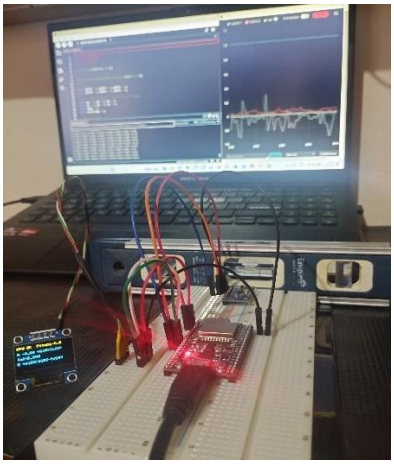
SSD1306 Pin Name	I^2C Interface	6800-parallel interface (8 bit)	8080-parallel interface (8 bit)	4-wire Serial interface	3-wire Serial interface
BS0	0	0	0	0	1
BS1	1	0	1	0	0
BS2	0	1	1	0	0

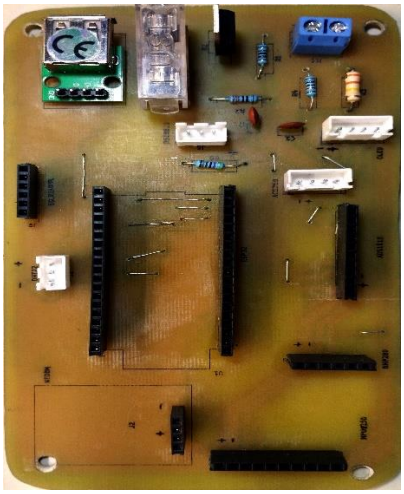
Note
(1) 0 is connected to V_{SS}
(2) 1 is connected to V_{DD}

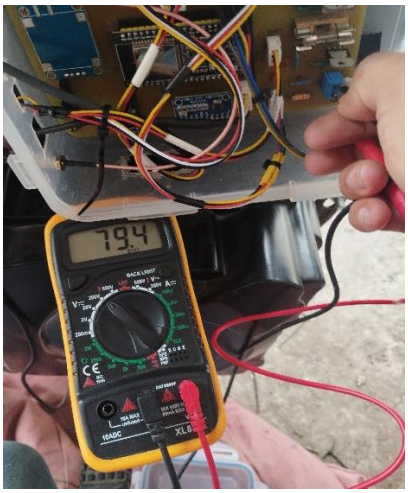
Anexo F. Evidencia fotográfica del desarrollo del proyecto

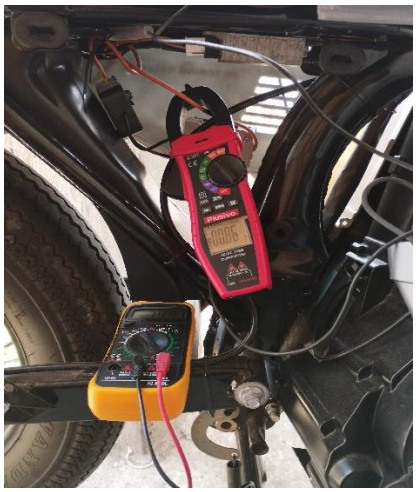


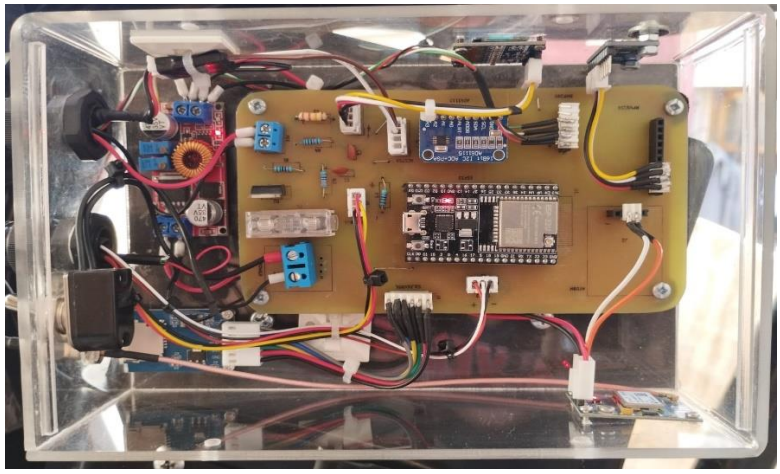












POLIDEPORTIVO
SAN AGUSTÍN
ALCALDÍA
IBARRA

FUTURO Y PORVENIR

Anexo F. Código ESP32

ESP32.ino

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <TinyGPSPlus.h>
#include <MPU9250_WE.h>
#include <DHT.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Adafruit_ADS1X15.h>
#include <U8g2lib.h>
// CONFIGURACIÓN
const uint8_t DHTPIN = 16;
const uint8_t ONE_WIRE_BUS = 17;
const uint8_t SD_CS = 5;
#define DHTTYPE DHT22
// ADS1115
const uint8_t ADS_ADDR = 0x48;
const adsGain_t ADS_GAIN = GAIN_ONE;  // ±4.096V
const int ACS_CHANNEL = 1;            // A1
const int DIV_CHANNEL = 0;            // A0
const int ACS_AVG_N = 40;
const int DIV_AVG_N = 40;
const int OFFSET_CAL_N = 600;
// ACS758 a 3V
const float ACS_SENS_mV_A = 24.00;  // mV/A
// Divisor
const float R1 = 330000.0;
const float R2 = 10000.0;
const float DIV_FACTOR = (R1 + R2) / R2;
int16_t rawDIV = 0;
float vDIV = NAN;
float vBAT = NAN;
// GPS
const int GPS_TX = 33;
const int GPS_RX = 34;
const uint32_t GPS_BAUD = 9600;
const int GPS_MIN_SATS = 7;
const float GPS_MAX_HDOP = 2.5f;
// Variables de navegación
double lastLat = 0.0;
double lastLng = 0.0;
bool hasLastFix = false;
float totalDistance_km = 0.0;
//  OBJETOS
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature ds18b20(&oneWire);
Adafruit_BMP280 bmp;
TinyGPSPlus gps;
MPU9250_WE mpu = MPU9250_WE(&Wire, 0x68);
Adafruit_ADS1115 ads;
HardwareSerial GPSSerial(2);
U8G2_SSD1306_128X64_NONAME_1_HW_I2C u8g2(U8G2_R0);
// Variables de calibración del MPU9250
bool mpuCalibrated = false;
float gOffX = 0.0;
float gOffY = 0.0;
float gOffZ = 0.0;
float aOffX = 0.0;
float aOffY = 0.0;
float aOffZ = 0.0;
bool okADS = false;
bool okACS = false;
bool okDIV = false:
```

```
bool okMPU = false;
bool okBMP = false;
bool okDHT = false;
bool okDS = false;
bool okSD = false;
bool okGPS = false;
bool headerWritten = false;
bool isRecording = false;
bool readyToRecord = false;
float presionNivelMarCalibrada = 1013.25;
const float ALTITUD_INICIO_CONOCIDA = 2217.0; // Altura del punto de inicio de pruebas
// VARIABLES
int16_t offsetRaw = 0;
const float lsbV = 0.000125f;
// ACS1115
int16_t rawACS = 0;
float vOUT = NAN;
float currentA = NAN;
float currentFiltA = 0.0;
// Estimación SoC
const float BAT_CAP_AH = 25.0;
float socCC = 100.0;
float Ah_used = 0.0;
unsigned long lastSocMs = 0;
const float V_BAT_MIN = 63.0; // 0%
const float V_BAT_MAX = 78.0; // 100%
// FUNCIONES AUXILIARES
float clampf(float x, float a, float b) {
  if (x < a) return a;
  if (x > b) return b;
  return x;
}
void estimarSocInicial() {
long dSum = 0;
for (int i = 0; i < 50; i++) {
dSum += ads.readADC_SingleEnded(DIV_CHANNEL);
delay(5);
}
int16_t raw_inicial = (int16_t)(dSum / 50);
float vDIV_inicial = raw_inicial * lsbV;
float vBAT_inicial = vDIV_inicial * DIV_FACTOR;
u8g2.firstPage();
  do {
    u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf);
    u8g2.setCursor(0, 25);
    u8g2.print("Calculando SoC...");
    u8g2.setCursor(0, 40);
    u8g2.print("V_ini: ");
    u8g2.print(vBAT_inicial, 1);
  } while (u8g2.nextPage());
  delay(3000);
  float calculado = ((vBAT_inicial - V_BAT_MIN) / (V_BAT_MAX - V_BAT_MIN)) * 100.0f;
  socCC = clampf(calculado, 0.0f, 100.0f);
  Ah_used = BAT_CAP_AH * (1.0f - (socCC / 100.0f));
  u8g2.firstPage();
  do {
    u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf);
    u8g2.setCursor(0, 25);
    u8g2.print("SoC Inicial");
    u8g2.setCursor(0, 40);
    u8g2.print("SoC: ");
    u8g2.print(socCC, 1);
    u8g2.print("%");
  } while (u8g2.nextPage());
```

```
  delay(5000);
}
void updateSoC_Coulomb(float currentA) {
  unsigned long now = millis();
  if (lastSocMs == 0) { lastSocMs = now; return; }
  float dt_s = (now - lastSocMs) / 1000.0f;
  lastSocMs = now;
  if (dt_s <= 0.0f || dt_s > 2.0f) return;
  float I = (fabs(currentA) < 0.3f) ? 0.0f : currentA;
  Ah_used = clampf(Ah_used + I * (dt_s / 3600.0f), 0.0f, BAT_CAP_AH);
  float Ah_rem = BAT_CAP_AH - Ah_used;
  socCC = clampf((Ah_rem / BAT_CAP_AH) * 100.0f, 0.0f, 100.0f);
}
// FUNCIONES DE IMPRESIÓN
void printFloatCSV(File & f, float value, int decimals) {
  if (isnan(value)) {
  f.print("NaN");
  return;
  }
  String s = String(value, decimals);
  s.replace('.', ',');
  f.print(s);
  }
void twoDigitsPrint(U8G2 & d, int v) {
    if (v < 10) d.print('0');
    d.print(v);
  }
// FUNCIONES OLED
void drawSensorList() {
  const int xL = 0;
  const int xR = 66;
  auto mark = [](bool ok) { return ok ? "OK" : "--"; };
  u8g2.firstPage();
  do {
    u8g2.setFont(u8g2_font_6x10_tf);
    u8g2.setCursor(xL, 24); u8g2.print("ADS:");     u8g2.print(mark(okADS));
    u8g2.setCursor(xR, 24); u8g2.print("MPU9250:"); u8g2.print(mark(okMPU));
    u8g2.setCursor(xL, 34); u8g2.print("ACS758:");  u8g2.print(mark(okACS));
    u8g2.setCursor(xR, 34); u8g2.print("DS18B20:"); u8g2.print(mark(okDS));
    u8g2.setCursor(xL, 44); u8g2.print("DivRes:"); u8g2.print(mark(okDIV));
    u8g2.setCursor(xR, 44); u8g2.print("DHT22:");   u8g2.print(mark(okDHT));
    u8g2.setCursor(xL, 54); u8g2.print("GPS:");     u8g2.print(mark(okGPS));
    u8g2.setCursor(xR, 54); u8g2.print("BMP280:");  u8g2.print(mark(okBMP));
  } while (u8g2.nextPage());
}
// FUNCIONES GPS
void gpsDecodePump(unsigned long ms) {
    unsigned long t0 = millis();
    while (millis() - t0 < ms) {
      while (GPSSerial.available()) gps.encode(GPSSerial.read());
      delay(2);
    }
  }
bool gpsIsGoodFix() {
    if (!gps.location.isValid()) return false;
    if (gps.location.age() > 2000) return false;
    int sats = gps.satellites.isValid() ? gps.satellites.value() : 0;
    if (sats < GPS_MIN_SATS) return false;
    if (gps.hdop.isValid()) {
      float hdop = gps.hdop.hdop();
      if (hdop > GPS_MAX_HDOP) return false;
    }
    return true;
  }
```

```
void waitForGPSFixForever() {
  while (true) {
    gpsDecodePump(400);
    int sats = gps.satellites.isValid() ? gps.satellites.value() : 0;
    float hdop = gps.hdop.isValid() ? gps.hdop.hdop() : NAN;
    u8g2.firstPage();
    do {
      u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf);
      u8g2.setCursor(0, 25);
      u8g2.print("Esperando GPS");
      u8g2.setCursor(0, 40);
      u8g2.print("Sats: ");
      u8g2.print(sats);
    } while (u8g2.nextPage());
    if (gpsIsGoodFix()) {
      u8g2.firstPage();
      do {
        u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf);
        u8g2.setCursor(0, 25);
        u8g2.print("GPS OK");
      } while (u8g2.nextPage());
      delay(600);
      return;
    }
  }
}
// FUNCIONES DE CALIBRACIÓN
int16_t calibrateOffsetRaw(int n) {
  long sum = 0;
  for (int i = 0; i < n; i++) {
    sum += ads.readADC_SingleEnded(ACS_CHANNEL);
    delay(2);
  }
  return (int16_t)(sum / n);
}
// FUNCIONES DE VERIFICACIÓN DE SENSORES
bool waitForSensor(const char* label, bool (*fn)()) {
    bool ok = false;
    unsigned long startWait = millis();
    while (!ok && (millis() - startWait < 5000)) {
    ok = fn();
    delay(500);
    }
    return ok;
  }
bool checkMPU() {
  return mpu.init();
}
bool checkBMP() {
  return bmp.begin(0x76);
}
bool checkADS() {
  ads.setGain(ADS_GAIN);
  return ads.begin(ADS_ADDR);
}
bool checkDHT() {
  return !isnan(dht.readTemperature());
}
bool checkDS() {
  ds18b20.requestTemperatures();
  return ds18b20.getTempCByIndex(0) != DEVICE_DISCONNECTED_C;
}
bool checkSD() {
  return SD.begin(SD_CS);
```

```
}
bool checkGPS() {
  unsigned long t0 = millis();
  while (millis() - t0 < 2500) {
  while (GPSSerial.available()) {
  gps.encode(GPSSerial.read());
  }
    if (gps.satellites.isValid() && gps.satellites.age() < 2000) {
      return true;
    }
    delay(5);
  }
  return false;
}
// Calibrar MPU
void calibrateMPU(int N = 800) {
  if (!okMPU) return;

  double sumAx = 0, sumAy = 0, sumAz = 0;
  double sumGx = 0, sumGy = 0, sumGz = 0;

    u8g2.firstPage();
  do {
    u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf);
    u8g2.setCursor(0, 25);
    u8g2.print("Calibrando MPU...");
    }
    while (u8g2.nextPage());
  delay(800);
    for (int i = 0; i < N; i++) {
    xyzFloat a = mpu.getGValues();
    xyzFloat g = mpu.getGyrValues();
    sumAx += a.x; sumAy += a.y; sumAz += a.z;
    sumGx += g.x; sumGy += g.y; sumGz += g.z;
    delay(5);
  }
  float ax0 = sumAx / N;
  float ay0 = sumAy / N;
  float az0 = sumAz / N;
  float gx0 = sumGx / N;
  float gy0 = sumGy / N;
  float gz0 = sumGz / N;
  // Offsets del acelerómetro:
  aOffX = ax0;
  aOffY = ay0;
  aOffZ = az0 - 1.0f;
  // Bias del giroscopio
  gOffX = gx0;
  gOffY = gy0;
  gOffZ = gz0;
  mpuCalibrated = true;
  u8g2.firstPage();
  do {
    u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf);
    u8g2.setCursor(0, 25);
    u8g2.print("MPU calibrado");
    u8g2.setCursor(0, 40);
    u8g2.print("aOffZ:");
    u8g2.print(aOffZ, 3);
    u8g2.setCursor(0, 55);
    u8g2.print("gOffX:");
    u8g2.print(gOffX, 2);
  } while (u8g2.nextPage());
  delay(3000);
```

```
}
//================SETUP==============//
  void setup() {
   // INICIALIZACIÓN GENERAL
    delay(2000);
    Serial.begin(115200);
    Wire.begin(26, 25);
    u8g2.begin();
    u8g2.firstPage();
    do {
      u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf);
      u8g2.setCursor(0, 30);
      u8g2.print("Iniciando Sistema DAQ");
    } while (u8g2.nextPage());
    delay(5000);
    drawSensorList();
// INICIALIZACIÓN DE SENSORES
// ADS1115
   ads.setGain(ADS_GAIN);
   okADS = ads.begin(ADS_ADDR);
   if (!okADS) okADS = waitForSensor("ADS1115", checkADS);
   if (okADS) ads.setDataRate(RATE_ADS1115_475SPS);
   okACS = okADS;
   okDIV = okADS;
   drawSensorList();
// GPS NEO 8M
    GPSSerial.begin(GPS_BAUD, SERIAL_8N1, GPS_RX, GPS_TX);
    okGPS = checkGPS();
    if (!okGPS) okGPS = waitForSensor("GPS", checkGPS);
    drawSensorList();
// MPU9250
    okMPU = mpu.init();
    if (!okMPU) okMPU = waitForSensor("MPU9250", checkMPU);
    if (okMPU) {
      mpu.setAccRange(MPU9250_ACC_RANGE_8G);
      mpu.setGyrRange(MPU9250_GYRO_RANGE_500);
      mpu.setGyrDLPF(MPU9250_DLPF_6);
      mpuCalibrated = false;
      }
    drawSensorList();
// DS18B20
    ds18b20.begin();
   ds18b20.setResolution(9);
    okDS = checkDS();
    if (!okDS) okDS = waitForSensor("DS18B20", checkDS);
    drawSensorList();
// DHT22
    dht.begin();
   okDHT = checkDHT();
   if (!okDHT) okDHT = waitForSensor("DHT22", checkDHT);
    drawSensorList();
// BMP280
    okBMP = bmp.begin(0x76);
    if (!okBMP) okBMP = waitForSensor("BMP280", checkBMP);
    if (okBMP){
      float sumaPresion = 0;
      for(int i=0; i<10; i++){
        sumaPresion += (bmp.readPressure()/100);
        delay(50);
      }
      float presionLocal = sumaPresion / 10.0;
      presionNivelMarCalibrada = presionLocal / pow(1.0 - (ALTITUD_INICIO_CONOCIDA / 44330.0), 5.255);
    }
    drawSensorList();
```

```
// SD
  okSD = checkSD();
  if (!okSD) okSD = waitForSensor("SD CARD", checkSD);
  drawSensorList();
//   VERIFICACIÓN DEL SISTEMA
  readyToRecord = (okSD && okADS && okGPS && okMPU && okDS && okDHT && okBMP && okACS && okDIV);
  while (!readyToRecord)
  {
    if (!okADS) okADS = checkADS();
    okACS = okADS; okDIV = okADS;
    if (!okGPS) okGPS = checkGPS();
    if (!okMPU) okMPU = checkMPU();
    if (!okDS) okDS = checkDS();
    if (!okDHT) okDHT = checkDHT();
    if (!okBMP) okBMP = checkBMP();
    if (!okSD) okSD = checkSD();
    drawSensorList();
    delay(800);
    readyToRecord = (okSD && okADS && okGPS && okMPU && okDS && okDHT && okBMP && okACS && okDIV);
    }
  drawSensorList(); delay(5000);
// CALIBRACIÓN DE SENSORES
calibrateMPU(800);
waitForGPSFixForever();
// Calibración del sensor de corriente
u8g2.firstPage();
do {
  u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf);
  u8g2.setCursor(0, 25);
  u8g2.print("Calibrando ACS...");
 } while (u8g2.nextPage());

offsetRaw = calibrateOffsetRaw(OFFSET_CAL_N);
u8g2.firstPage();
do {
  u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf);
  u8g2.setCursor(0, 25);
  u8g2.print("ACS calibrado");
  u8g2.setCursor(0, 40);
  u8g2.print("Offset:");
  u8g2.print(offsetRaw);
} while (u8g2.nextPage());
delay(5000);
// Estimación inicial del estado de carga
estimarSocInicial();
headerWritten = false;
  }
//==================LOOP====================//
  void loop() {
    static int ultimoSegundoGuardado = -1;
    static int contadorMuestras = 0;
    static float sumaV = 0, sumaI = 0, sumaVel = 0;
    static float sumaAltBMP = 0;
    static float sumaAccX = 0, sumaAccY = 0, sumaAccZ = 0;
    static float sumaGyrX = 0, sumaGyrY = 0, sumaGyrZ = 0;
//    RECEPCIÓN Y PROCESAMIENTO DEL GPS
// GPS decode
    while (GPSSerial.available()) gps.encode(GPSSerial.read());
static unsigned long lastGpsPrint = 0;
if (millis() - lastGpsPrint >= 1000) {
  lastGpsPrint = millis();
  int sats = gps.satellites.isValid() ? gps.satellites.value() : -1;
  float hdop = gps.hdop.isValid() ? gps.hdop.hdop() : -1.0f;
  Serial.print("GPS | sats=");
  if (sats >= 0) Serial.print(sats);
```

```
  else Serial.print("N/A");
  Serial.print(" hdop=");
  if (hdop >= 0) Serial.print(hdop, 1);
  else Serial.print("N/A");
  Serial.print(" fix=");
  Serial.print(gpsIsGoodFix() ? "OK" : "NO");
  Serial.print(" chars=");
  Serial.print(gps.charsProcessed());
  Serial.print(" age_ms=");
  Serial.println(gps.satellites.isValid() ? gps.satellites.age() : -1);
}
// Cálculo de distancia recorrida
if (gpsIsGoodFix()) {
  static unsigned long lastFixMs = 0;
  float dt_s = (millis() - lastFixMs) / 1000.0f;
  float maxDist = 50.0f * dt_s;
  double lat = gps.location.lat();
  double lng = gps.location.lng();
  if (hasLastFix) {
    double d = TinyGPSPlus::distanceBetween(
      lastLat, lastLng,
      lat, lng
    );
    // Filtro GPS
    if (d > 1.5 && d < maxDist) {
      totalDistance_km += d / 1000.0;
    }
  }
  lastLat = lat;
  lastLng = lng;
  hasLastFix = true;
  lastFixMs = millis();
}
    // lectura del MPU9250
    xyzFloat acc = { NAN, NAN, NAN };
    xyzFloat gyr = { NAN, NAN, NAN };
    if (okMPU) {
      acc = mpu.getGValues();
      gyr = mpu.getGyrValues();
      if (mpuCalibrated && okMPU) {
       acc.x -= aOffX;
       acc.y -= aOffY;
       acc.z -= aOffZ;
       gyr.x -= gOffX;
       gyr.y -= gOffY;
       gyr.z -= gOffZ;
      }
     }
    // DHT (cada 2s)
    static unsigned long lastDHTTime = 0;
    static float lastTempC = NAN;
    static float lastHum = NAN;
    if (millis() - lastDHTTime > 2000) {
      if (okDHT) {
        float t = dht.readTemperature();
        float h = dht.readHumidity();
        if (!isnan(t) && !isnan(h)) {
          lastTempC = t;
          lastHum = h;
        }
      }
      lastDHTTime = millis();
    }
    float tempC = lastTempC;
    float hum = lastHum;
```

```
516   // DS18B20 (cada 3s)
517   static unsigned long lastDSTime = 0;
518   static float lastTempDS = NAN;
519   if (millis() - lastDSTime > 3000) {
520     if (okDS) {
521       ds18b20.requestTemperatures();
522       float t = ds18b20.getTempCByIndex(0);
523       if (t != DEVICE_DISCONNECTED_C && t > -50.0) lastTempDS = t;
524     }
525     lastDSTime = millis();
526   }
527   float tempDS = lastTempDS;
528   // BMP280
529   float presBMP = NAN;
530   if (okBMP){
531   presBMP = bmp.readPressure() / 100.0;
532   float altBMP_inst = bmp.readAltitude(presionNivelMarCalibrada);
533   sumaAltBMP += altBMP_inst;
534   }
535   // ADS1115: ACS + divisor
536   if (okADS) {
537     long rSum = 0;
538     long dSum = 0;
539     int16_t rMin = 32767, rMax = -32768;
540     for (int i = 0; i < ACS_AVG_N; i++) {
541       while (GPSSerial.available()) gps.encode(GPSSerial.read());
542       // Leer Corriente
543       int16_t r = ads.readADC_SingleEnded(ACS_CHANNEL);
544       rSum += r;
545       if (r < rMin) rMin = r;
546       if (r > rMax) rMax = r;
547       // Leer Voltaje
548       dSum += ads.readADC_SingleEnded(DIV_CHANNEL);
549       delay(2);
550     }
551     // Cálculos de Corriente promediada
552     rawACS = (int16_t)(rSum / ACS_AVG_N);
553     vOUT = rawACS * lsbV;
554     float delta_mV = (rawACS - offsetRaw) * lsbV * 1000.0f;
555     currentA = delta_mV / ACS_SENS_mV_A;
556     currentFiltA = currentA;
557     updateSoC_Coulomb(currentFiltA);
558           // Cálculo de Voltaje promediado
559     rawDIV = (int16_t)(dSum / DIV_AVG_N);
560     vDIV = rawDIV * lsbV;
561     vBAT = vDIV * DIV_FACTOR;
562   }
563   sumaV += vBAT;
564   sumaI += currentA;
565   if (gps.speed.isValid()) sumaVel += gps.speed.kmph();
566   if (okMPU) {
567     sumaAccX += acc.x;
568     sumaAccY += acc.y;
569     sumaAccZ += acc.z;
570     sumaGyrX += gyr.x;
571     sumaGyrY += gyr.y;
572     sumaGyrZ += gyr.z;
573   }
574   contadorMuestras++;
575   // Configuración Fecha/hora
576   int myYear = 0, myMonth = 0, myDay = 0, myHour = 0, myMinute = 0, mySecond = 0;
577   if (gps.time.isValid() && gps.date.isValid()) {
578     myYear = gps.date.year();
579     myMonth = gps.date.month();
580     myDay = gps.date.day();
```

```
    myHour = gps.time.hour();
    myMinute = gps.time.minute();
    mySecond = gps.time.second();
    myHour = myHour - 5;
    if (myHour < 0) {
      myHour += 24;
      myDay -= 1;
      if (myDay < 1) {
        myMonth -= 1;
        myDay = 28;
      }
    }
  }
  // Almacenamiento en tarjeta microSD
  if (readyToRecord && gps.time.isValid() && (mySecond != ultimoSegundoGuardado)) {
    ultimoSegundoGuardado = mySecond;  //
    if (contadorMuestras == 0) contadorMuestras = 1;
    float promV = sumaV / contadorMuestras;
    float promI = sumaI / contadorMuestras;
    float promVel = sumaVel / contadorMuestras;
    float promAccX = sumaAccX / contadorMuestras;
    float promAccY = sumaAccY / contadorMuestras;
    float promAccZ = sumaAccZ / contadorMuestras;
    float promGyrX = sumaGyrX / contadorMuestras;
    float promGyrY = sumaGyrY / contadorMuestras;
    float promGyrZ = sumaGyrZ / contadorMuestras;
    File dataFile = SD.open("/daq.csv", FILE_APPEND);
    if (dataFile) {
      if (!headerWritten) {
        dataFile.println("Fecha;Hora;Vbat;I;SoC;Vel_kmh;Dist_km;AccX;AccY;AccZ;GyrX;GyrY;GyrZ;Sats;Lat;Lng;Alt_m;TempA;TempBat;Alt_BMP;Pres_hPa;Hum");
        headerWritten = true;
      }
      isRecording = true;
      char buffer[20];
      if (gps.date.isValid()) {
      sprintf(buffer, "%02d/%02d/%04d", myDay, myMonth, myYear);
        dataFile.print(buffer);
      }
      dataFile.print(';');
      if (gps.time.isValid()) {
        sprintf(buffer, "%02d:%02d:%02d", myHour, myMinute, mySecond);
        dataFile.print(buffer);
      }
      dataFile.print(';');
      printFloatCSV(dataFile, promV, 2);
      dataFile.print(';');
      printFloatCSV(dataFile, promI, 2);
      dataFile.print(';');
      printFloatCSV(dataFile, socCC, 1);
      dataFile.print(';');
      if (gps.speed.isValid()) printFloatCSV(dataFile, promVel, 1);
      else dataFile.print("0,0");
      dataFile.print(';');
      printFloatCSV(dataFile, totalDistance_km, 3);
      dataFile.print(';');
      if (okMPU) {
        printFloatCSV(dataFile, promAccX, 3);
        dataFile.print(';');
        printFloatCSV(dataFile, promAccY, 3);
        dataFile.print(';');
        printFloatCSV(dataFile, promAccZ, 3);
        dataFile.print(';');
        printFloatCSV(dataFile, promGyrX, 3);
        dataFile.print(';');
        printFloatCSV(dataFile, promGyrY, 3);
```

```
646             dataFile.print(';');
647             printFloatCSV(dataFile, promGyrZ, 3);
648             dataFile.print(';');
649           } else dataFile.print(";;;;;;");
650             if (gps.satellites.isValid()){
651             dataFile.print(gps.satellites.value());
652             }
653             dataFile.print(";");
654             if (gps.location.isValid()) {
655             printFloatCSV(dataFile, gps.location.lat(), 6);
656             dataFile.print(';');
657             printFloatCSV(dataFile, gps.location.lng(), 6);
658             dataFile.print(';');
659           } else {
660             dataFile.print(";;");
661           }
662           if (gps.altitude.isValid()) {
663           printFloatCSV(dataFile, gps.altitude.meters(), 1);
664           }
665           dataFile.print(';');
666           printFloatCSV(dataFile, tempC, 1);
667           dataFile.print(';');
668           printFloatCSV(dataFile, tempDS, 1);
669           dataFile.print(';');
670           float promAltBMP = sumaAltBMP / contadorMuestras;
671           printFloatCSV(dataFile, promAltBMP,1);
672           dataFile.print(";");
673           printFloatCSV(dataFile, presBMP, 1);
674           dataFile.print(';');
675           printFloatCSV(dataFile, hum, 1);
676           dataFile.println();
677           dataFile.close();
678         } else {
679           isRecording = false;
680           SD.end();
681           SD.begin(SD_CS);
682         }
683         sumaV = 0;
684         sumaI = 0;
685         sumaAltBMP = 0;
686         sumaVel = 0;
687         sumaAccX = 0;
688         sumaAccY = 0;
689         sumaAccZ = 0;
690         sumaGyrX = 0;
691         sumaGyrY = 0;
692         sumaGyrZ = 0;
693         contadorMuestras = 0;
694       }
695       // Visualización en pantalla OLED
696       u8g2.firstPage();
697       do {
698         u8g2.setFont(u8g2_font_6x10_tf);
699         u8g2.setCursor(0, 10);
700         u8g2.print(myDay);
701         u8g2.print("/");
702         u8g2.print(myMonth);
703         u8g2.setCursor(50, 10);
704         twoDigitsPrint(u8g2, myHour);
705         u8g2.print(":");
706         twoDigitsPrint(u8g2, myMinute);
707          u8g2.setCursor(95, 10);
708         if (isRecording) u8g2.print("REC");
709         else u8g2.print("NO SD!");
710         u8g2.drawLine(0, 12, 128, 12);
```

```
      u8g2.setCursor(0, 23);
      u8g2.print("V:");
      u8g2.print(vBAT, 1);
      u8g2.setCursor(0, 33);
      u8g2.print("I:");
      u8g2.print(currentFiltA, 1);
      u8g2.setCursor(55, 23);
      u8g2.print("SoC:");
      u8g2.print(socCC, 0);
      u8g2.print("%");
      u8g2.setCursor(55, 33);
      u8g2.print("Alt: ");
      if (gps.altitude.isValid()) u8g2.print(gps.altitude.meters(), 0);
      else u8g2.print("--");
      u8g2.setCursor(0, 45);
      u8g2.print("SAT:");
      if (gps.satellites.isValid()) u8g2.print(gps.satellites.value());
      else u8g2.print("--");
      u8g2.setCursor(55, 45);
      u8g2.print("D:");
      u8g2.print(totalDistance_km, 2);
      u8g2.print("km");
      u8g2.setCursor(0, 60);
      u8g2.print("TA:");
      u8g2.print(tempC, 0);
      u8g2.setCursor(42, 60);
      u8g2.print("TB:");
      u8g2.print(tempDS, 0);
      u8g2.setCursor(88, 60);
      u8g2.print("HR:");
      u8g2.print(hum, 0);
    }
      while (u8g2.nextPage());
    Serial.print("Altitud: ");
    Serial.println(gps.altitude.meters(), 0);
    Serial.print("Longitud: ");
    Serial.println(gps.location.lng(), 6);
    Serial.print("Latitud: ");
    Serial.println(gps.location.lat(), 6);
  float amag = sqrt(acc.x*acc.x + acc.y*acc.y + acc.z*acc.z);
  Serial.print(gyr.x,2); Serial.print(' ');
  Serial.print(gyr.y,2); Serial.print(' ');
  Serial.print(gyr.z,2); Serial.print(' ');
  Serial.print(acc.x,3); Serial.print(' ');
  Serial.print(acc.y,3); Serial.print(' ');
  Serial.print(acc.z,3); Serial.print(' ');
  Serial.println(amag,3);
  delay(10);
  }
```

Anexo G. Tablas de resultados obtenidos de MATLAB

```
>> Resultados_Ruta1
```

RESULTADOS RUTA 1

Ruta	Tiempo Transcurrido	Temp. Ambiente	Temp. Batería	Densidad Aire
1	0 h 23 min 39 s	17.82 °C	24.97 °C	0.93 kg/m3

Resultados

Distancia Recorrida (km)	9.05
Energía Consumida (Wh)	350.76
Energía Regenerada (Wh)	32.09
Consumo Específico (Wh/km)	35.60
Capacidad Extraída (Ah)	4.89
Estado de Carga Inicial (%)	100.00
Estado de Carga Final (%)	82.20
Consumo del Estado de Carga (SoC)	17.80
Voltaje Inicial (V)	79.50
Voltaje Final (V)	77.00
Voltaje Mínimo (V)	69.41
Voltaje Máximo en Regeneración (V)	84.33
Voltaje Promedio (V)	75.37
Corriente Promedio (A)	11.38
Corriente Máxima Demandada (A)	39.54
Corriente Máxima en Regeneración (A)	-14.15
Potencia Eléctrica Máxima (kW)	2.79
Altitud Máxima (m s.n.m.)	2225.20
Altitud Mínima (m s.n.m.)	2183.40
Altitud Promedio (m s.n.m.)	2215.78
Ganancia de Elevación (m)	67.14
Pérdida de Elevación (m)	67.77
Pendiente Máxima Positiva (%)	11.69
Pendiente Máxima Negativa (%)	-18.37
Pendiente Promedio Positiva (%)	2.42
Pendiente Promedio Negativa (%)	-2.38
Pendiente descenso (%)	23.68
Tramos planos (%)	63.33
Pendiente moderada (%)	9.02
Pendiente fuerte (%)	3.96
Velocidad Máxima (km/h)	56.70
Velocidad Promedio (km/h)	22.60
Aceleración Máxima (m/s2)	3.37
Aceleración Promedio (m/s2)	0.66

```
>> Resultados_Ruta2
================================================================================
                    RESULTADOS RUTA 2 - CIRCUITO DE ASCENSO CONTINUO
================================================================================
Ruta      Tiempo Transcurrido     Temp. Ambiente      Temp. Batería       Densidad Aire
1            0 h 21 min 48 s        30.03 °C            30.60 °C             0.87 kg/m3
--------------------------------------------------------------------------------
```

Resultados

Distancia Recorrida (km)	9.32
Energía Consumida (Wh)	570.55
Energía Regenerada (Wh)	12.51
Consumo Específico (Wh/km)	60.04
Capacidad Extraída (Ah)	8.24
Estado de Carga Inicial (%)	100.00
Estado de Carga Final (%)	67.70
Consumo del Estado de Carga (SoC)	32.30
Voltaje Inicial (V)	78.93
Voltaje Final (V)	73.86
Voltaje Mínimo (V)	66.27
Voltaje Máximo en Regeneración (V)	85.05
Voltaje Promedio (V)	71.99
Corriente Promedio (A)	22.22
Corriente Máxima Demandada (A)	39.58
Corriente Máxima en Regeneración (A)	-13.87
Potencia Eléctrica Máxima (kW)	2.75
Altitud Máxima (m s.n.m.)	2646.00
Altitud Mínima (m s.n.m.)	2216.50
Altitud Promedio (m s.n.m.)	2386.87
Ganancia de Elevación (m)	438.50
Pérdida de Elevación (m)	12.90
Pendiente Máxima Positiva (%)	17.04
Pendiente Máxima Negativa (%)	-10.05
Pendiente Promedio Positiva (%)	5.53
Pendiente Promedio Negativa (%)	-2.20
Pendiente descenso (%)	2.42
Tramos planos (%)	26.62
Pendiente moderada (%)	34.97
Pendiente fuerte (%)	35.99
Velocidad Máxima (km/h)	47.70
Velocidad Promedio (km/h)	25.41
Aceleración Máxima (m/s2)	4.98
Aceleración Promedio (m/s2)	0.82

```
>> Resultados_Ruta3
================================================================================================
                    RESULTADOS RUTA 3 - TRAVESÍA DE PERFIL COMPLEJO
================================================================================================
Ruta     Tiempo Transcurrido    Temp. Ambiente     Temp. Batería      Densidad Aire
1           0 h 22 min 41 s       28.98 °C           25.50 °C           0.90 kg/m3
------------------------------------------------------------------------------------------------
```

Resultados

Distancia Recorrida (km)	13.99
Energía Consumida (Wh)	453.93
Energía Regenerada (Wh)	17.97
Consumo Específico (Wh/km)	32.23
Capacidad Extraída (Ah)	6.49
Estado de Carga Inicial (%)	100.00
Estado de Carga Final (%)	74.90
Consumo del Estado de Carga (SoC)	25.10
Voltaje Inicial (V)	78.63
Voltaje Final (V)	75.13
Voltaje Mínimo (V)	67.24
Voltaje Máximo en Regeneración (V)	86.44
Voltaje Promedio (V)	72.74
Corriente Promedio (A)	16.56
Corriente Máxima Demandada (A)	39.51
Corriente Regenerativa Máxima (A)	-14.08
Potencia Eléctrica Máxima (kW)	2.71
Altitud Máxima (m s.n.m.)	2385.50
Altitud Mínima (m s.n.m.)	2205.88
Altitud Promedio (m s.n.m.)	2254.42
Ganancia de Elevación (m)	266.82
Pérdida de Elevación (m)	238.40
Pendiente Máxima Positiva (%)	21.42
Pendiente Máxima Negativa (%)	-17.00
Pendiente Promedio Positiva (%)	5.58
Pendiente Promedio Negativa (%)	-4.23
Pendiente descenso (%)	37.96
Tramos planos (%)	35.98
Pendiente moderada (%)	14.10
Pendiente fuerte (%)	11.96
Velocidad Máxima (km/h)	60.30
Velocidad Promedio (km/h)	36.82
Aceleración Máxima (m/s2)	2.41
Aceleración Promedio (m/s2)	0.75

```
================================================================================================
```

```
>> Resultados_Ruta4
================================================================================================
                    RESULTADOS RUTA 4 - TRANSVERSAL DE CICLO TRANSITORIO
================================================================================================
Ruta     Tiempo Transcurrido    Temp. Ambiente     Temp. Batería      Densidad Aire
1           0 h 31 min  9 s       17.94 °C           26.37 °C           0.93 kg/m3
------------------------------------------------------------------------------------------------
```

Resultados

Distancia Recorrida (km)	9.61
Energía Consumida (Wh)	428.31
Energía Regenerada (Wh)	19.20
Consumo Específico (Wh/km)	42.59
Capacidad Extraída (Ah)	6.02
Estado de Carga Inicial (%)	100.00
Estado de Carga Final (%)	77.10
Consumo del Estado de Carga (SoC)	22.90
Voltaje Inicial (V)	79.42
Voltaje Final (V)	69.96
Voltaje Mínimo (V)	68.50
Voltaje Máximo en Regeneración (V)	83.31
Voltaje Promedio (V)	75.08
Corriente Promedio (A)	11.13
Corriente Máxima Demandada (A)	39.38
Corriente Regenerativa Máxima (A)	-14.41
Potencia Eléctrica Máxima (kW)	2.77
Altitud Máxima (m s.n.m.)	2352.60
Altitud Mínima (m s.n.m.)	2182.20
Altitud Promedio (m s.n.m.)	2241.77
Ganancia de Elevación (m)	221.80
Pérdida de Elevación (m)	84.40
Pendiente Máxima Positiva (%)	17.33
Pendiente Máxima Negativa (%)	-17.77
Pendiente Promedio Positiva (%)	4.01
Pendiente Promedio Negativa (%)	-2.95
Pendiente descenso (%)	17.48
Tramos planos (%)	44.48
Pendiente moderada (%)	28.17
Pendiente fuerte (%)	9.87
Velocidad Máxima (km/h)	60.80
Velocidad Promedio (km/h)	18.26
Aceleración Máxima (m/s2)	3.70
Aceleración Promedio (m/s2)	0.60

```
================================================================================================
```

```
>> Resultados_Ruta5
```

RESULTADOS RUTA 5 - RUTA DE TRANSICIÓN PERIURBANA

Ruta	Tiempo Transcurrido	Temp. Ambiente	Temp. Batería	Densidad Aire
1	0 h 27 min 30 s	21.36 °C	21.75 °C	0.92 kg/m3

Resultados

Distancia Recorrida (km)	14.86
Energía Consumida (Wh)	614.10
Energía Regenerada (Wh)	21.09
Consumo Específico (Wh/km)	40.04
Capacidad Extraída (Ah)	8.96
Estado de Carga Inicial (%)	100.00
Estado de Carga Final (%)	65.30
Consumo del Estado de Carga (SoC)	34.70
Voltaje Inicial (V)	78.23
Voltaje Final (V)	72.94
Voltaje Mínimo (V)	64.68
Voltaje Máximo en Regeneración (V)	86.64
Voltaje Promedio (V)	71.79
Corriente Promedio (A)	18.96
Corriente Máxima Demandada (A)	39.57
Corriente Regenerativa Máxima (A)	-14.22
Potencia Eléctrica Máxima	2.72
Altitud Máxima (m s.n.m.)	2422.66
Altitud Mínima (m s.n.m.)	2183.42
Altitud Promedio (m s.n.m.)	2258.73
Ganancia de Elevación (m)	422.28
Pérdida de Elevación (m)	219.32
Pendiente Máxima Positiva (%)	23.10
Pendiente Máxima Negativa (%)	-9.15
Pendiente Promedio Positiva (%)	5.24
Pendiente Promedio Negativa (%)	-3.99
Pendiente descenso (%)	31.71
Tramos planos (%)	22.99
Pendiente moderada (%)	26.95
Pendiente fuerte (%)	18.35
Velocidad Máxima (km/h)	63.30
Velocidad Promedio (km/h)	32.18
Aceleración Máxima (m/s2)	3.03
Aceleración Promedio (m/s2)	0.64

```
>> Resultados_Ruta6
================================================================================================
                    RESULTADOS PRUEBAS DE DESCARGA PROFUNDA - RUTA 6
================================================================================================
Prueba    Tiempo Transcurrido     Temp. Ambiente      Temp. Batería       Densidad Aire
6A         1 h 33 min 49 s        23.72 °C            21.89 °C            0.92 kg/m3
6B         0 h 57 min 24 s        24.91 °C            23.56 °C            0.91 kg/m3
6C         0 h 58 min 29 s        22.52 °C            21.52 °C            0.92 kg/m3
------------------------------------------------------------------------------------------------
------------------------------------------------------------------------------------------------
```

	Prueba_6A	Prueba_6B	Prueba_6C
Distancia Recorrida (km)	50.53	40.41	40.39
Energía Consumida (Wh)	1097.02	1050.17	1095.73
Energía Regenerada (Wh)	7.34	6.86	8.56
Consumo Especifico (Wh/km)	21.59	25.84	26.95
Capacidad Extraída (Ah)	15.73	15.30	16.08
Estado de Carga Inicial (%)	100.00	100.00	100.00
Estado de Carga Final (%)	37.60	39.20	36.20
Consumo del Estado de Carga (SoC)	62.40	60.80	63.80
Voltaje Inicial (V)	78.69	78.60	78.42
Voltaje Final (V)	69.22	69.22	68.78
Voltaje Mínimo (V)	61.24	61.42	61.21
Voltaje Máximo en Regeneración (V)	80.40	79.09	82.59
Voltaje Promedio (V)	71.14	69.91	69.14
Corriente Promedio (A)	9.99	15.89	16.38
Corriente Máxima Demandada (A)	39.25	39.92	39.76
Corriente Regenerativa Máxima (A)	-11.97	-14.19	-14.19
Potencia Eléctrica Máxima (kW)	2.67	2.70	2.68
Altitud Máxima (m s.n.m.)	2239.90	2240.20	2239.30
Altitud Mínima (m s.n.m.)	2205.80	2205.10	2206.20
Altitud Promedio (m s.n.m.)	2219.55	2220.32	2219.67
Ganancia de Elevación (m)	80.68	79.26	83.60
Pérdida de Elevación (m)	120.36	117.32	143.26
Pendiente Máxima Positiva (%)	10.87	9.67	11.09
Pendiente Máxima Negativa (%)	-8.63	-8.25	-8.04
Pendiente Promedio Positiva (%)	1.95	1.87	1.99
Pendiente Promedio Negativa (%)	-1.90	-1.90	-1.97
Velocidad Máxima (km/h)	50.80	58.00	61.40
Velocidad Promedio (km/h)	32.16	42.03	41.22
Aceleración Máxima (m/s2)	2.25	1.96	3.13
Aceleración Promedio (m/s2)	0.47	0.48	0.50

```
================================================================================================
```