



Evaluación energética y ambiental de bicicletas eléctricas para movilidad urbana en el Área Metropolitana de Bucaramanga durante 2026

Modalidad: Trabajo de investigación

Edward Esteban Mejia Meneses

CC 1005221451

Sergio Ariel Parra Nova

CC 1005247372

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍAS
Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico
Bucaramanga 19 de junio 2026



Evaluación energética y ambiental de bicicletas eléctricas para movilidad urbana
en el Área Metropolitana de Bucaramanga durante 2026

Modalidad: Trabajo de investigación

Edward Esteban Mejia Meneses

CC 1005221451

Sergio Ariel Parra Nova

CC 1005247372

Trabajo de Grado para optar al título de
Tecnología en operación y mantenimiento electromecánico

DIRECTOR

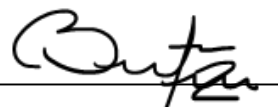
Javier Ascanio Villabona

Grupo de investigación – GISEAC

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍAS
Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico
Bucaramanga 19 de junio 2026

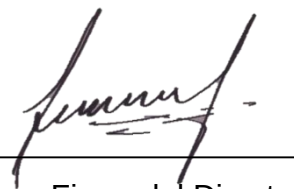
Nota de Aceptación

Este informe final de trabajo de grado,
en modalidad de proyecto de investigación, fue APROBADO
en cumplimiento de uno de los requisitos exigidos por las
Unidades Tecnológicas de Santander para optar el
Título de Tecnólogo en Operación y Mantenimiento Electromecánico
según acta No.016 del 23 de junio del 2026,
del Comité de Trabajo de Grado



Firma del Evaluador

Nombre: Brayan Eduardo Tarazona



Firma del Director

Nombre: Javier Ascanio Vilabona

Dedicatoria

Dedico este logro a las **UTS**, mi casa de estudios, por abrirme las puertas al mundo industrial. Gracias a mis docentes por su guía y a la institución por fomentar la excelencia técnica que hoy represento con orgullo

A las **Unidades Tecnológicas de Santander**, por brindarme la formación técnica y científica necesaria para mi desarrollo profesional. Gracias a esta institución por ser la base de mis conocimientos en operación y mantenimiento electromecánico.

Agradecimientos

Al Ingeniero Javier Ascanio Villabona, director de este proyecto y docente de las Unidades Tecnológicas de Santander, por su asesoría técnica invaluable, su paciencia y por compartir sus conocimientos en sistemas electromecánicos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo del modelo energético.

Al Grupo de Investigación GISEAC, por facilitar el acceso a la información y bases de datos necesarias para la fundamentación técnica y el estado del arte de esta investigación.

A las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS), nuestra casa de estudios, por brindarnos las herramientas académicas y el entorno científico propicio para desarrollar competencias en el área de operación y mantenimiento electromecánico.

A las entidades y organismos del Área Metropolitana de Bucaramanga, que mediante sus reportes y diagnósticos suministraron los datos topográficos y de movilidad que permitieron contextualizar este estudio a la realidad de nuestra región.

TABLA DE CONTENIDO

<u>DEDICATORIA</u>	<u>4</u>
<u>AGRADECIMIENTOS</u>	<u>5</u>
<u>RESUMEN EJECUTIVO</u>	<u>11</u>
<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>13</u>
<u>DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN</u>	<u>15</u>
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
JUSTIFICACIÓN	17
OBJETIVOS	18
OBJETIVO GENERAL	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
ESTADO DEL ARTE	19
<u>MARCO REFERENCIAL</u>	<u>24</u>
MARCO CONCEPTUAL	25
MARCO TEÓRICO	27
MARCO LEGAL	28

MARCO AMBIENTAL	29
MARCO HISTÓRICO	30
<u>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</u>	<u>31</u>
FASE I. MODELADO ENERGÉTICO Y ESTIMACIÓN DE AUTONOMÍA	31
FASE II. EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE CONFIGURACIONES DE POTENCIA.....	32
FASE III. CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL	33
INTEGRACIÓN METODOLÓGICA.....	35
<u>DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADOL TRABAJO DE GRADO</u>	<u>37</u>
DESARROLLO DEL MODELO ENERGÉTICO.....	37
EVALUACIÓN DE CONFIGURACIONES DE POTENCIA	39
ESTIMACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL	40
INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE ANÁLISIS.....	41
<u>RESULTADOS</u>	<u>42</u>
RESULTADOS DEL MODELO ENERGÉTICO	42
CURVAS $E_s(\theta)$ Y $A(\theta)$	44
RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE POTENCIA.....	45
CAPACIDAD DE RESPUESTA EN PENDIENTE	45
EVALUACIÓN MULTICRITERIO (AHP)	46
RESULTADOS DEL MODELO AMBIENTAL	47

REDUCCIÓN POR USUARIO.....	48
PROYECCIÓN TEMPORAL	48
ESCENARIOS DE ADOPCIÓN	49
INTEGRACIÓN DE RESULTADOS	50
SÍNTESIS POR PENDIENTE (CONDICIONES BASE)	50
DESEMPEÑO POR CONFIGURACIÓN DE POTENCIA.....	51
CONSUMO AGREGADO POR CONFIGURACIÓN	52
VALIDACIÓN DEL MODELO	55
COMPARACIÓN DE CONSUMO Y AUTONOMÍA CON RANGOS REPORTADOS	55
CONSISTENCIA ELÉCTRICA (CORRIENTE Y PÉRDIDAS)	56
CONSISTENCIA AMBIENTAL	57
<u>CONCLUSIONES</u>	<u>61</u>
<u>RECOMENDACIONES</u>.....	<u>63</u>
<u>REFERENCIAS</u>	<u>64</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Curvas de consumo energético y autonomía	44
Figura 2 Grafico de evaluación multicriterio (AHP)	47
Figura 3 Grafico de reducción anual de emisiones de CO2 según escenario de adopción	50
Figura 4 Potencia requerida en función de la pendiente.....	53
Figura 5 Corriente del sistema a 48V Y 72V en función de la pendiente.....	54
Figura 6 Consumo energético promedio por configuración de potencia y voltaje	55
Figura 7 Validación del modelo – consumo energético	58
Figura 8 Corriente del sistema en función de la pendiente.....	59
Figura 9 Comparación de factores de emisión entre motocicletas y bicicleta eléctrica.....	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Consumo energético por pendiente.....	42
Tabla 2 Autonomía proyectada.....	43
Tabla 3 Capacidad para operar en diferentes condiciones de pendiente y según configuración de potencia	45
Tabla 4 Evaluación multicriterio (AHP) según configuración de potencia.....	46
Tabla 5 Reducción de emisiones de CO2 por usuario correspondiente a un recorrido diario de 30km	48
Tabla 6 Reducción anual de emisiones según escenario de adopción.....	49
Tabla 7 Síntesis de resultado por pendiente	51
Tabla 8 Desempeño operativo por configuración de potencia.....	51
Tabla 9 Consumo energético y autonomía promedio por configuración.....	52
Tabla 10 Comparativa de consumo y autonomía	56
Tabla 11 Consistencia eléctrica.....	56
Tabla 12 Consistencia ambiental.....	57

Resumen ejecutivo

Se evalúa el desempeño energético y el impacto ambiental de bicicletas eléctricas en el Área Metropolitana de Bucaramanga, mediante modelado matemático y análisis de datos secundarios. El objetivo consiste en cuantificar la relación entre pendiente, potencia requerida, consumo energético y autonomía, así como determinar la configuración de potencia que permite operación estable bajo condiciones topográficas urbanas y estimar la reducción de emisiones asociada a la sustitución de motocicletas.

La metodología se fundamenta en la dinámica longitudinal del sistema bicicleta usuario, considerando las fuerzas de rodadura, aerodinámica y gravitacional. La potencia requerida se calcula como el producto de la fuerza total y la velocidad, y el consumo energético específico se obtiene a partir de la relación entre potencia y distancia recorrida. Se simulan escenarios de pendiente entre 1° y 45° y configuraciones de potencia entre 350 W y 1000 W, integrando un análisis multicriterio para la selección de la alternativa óptima. La estimación ambiental se realiza mediante factores de emisión representativos del contexto colombiano.

Los resultados muestran incremento no lineal del consumo energético con la pendiente, con valores entre 18 Wh/km en condiciones planas y superiores a 100 Wh/km en pendientes elevadas. La autonomía presenta reducción significativa en escenarios de alta inclinación. La configuración de 850 W a 72 V mantiene capacidad de operación en pendientes urbanas con menor incremento de pérdidas térmicas. La reducción de emisiones alcanza aproximadamente 3.53 kgCO₂ por usuario en recorridos diarios de 30 km.

Se concluye que la pendiente constituye la variable dominante en la demanda energética del sistema, condicionando la selección de potencia y el desempeño global. El modelo desarrollado permite establecer relaciones cuantitativas entre variables de

operación y constituye una herramienta para la evaluación técnica y ambiental de sistemas de movilidad eléctrica ligera en entornos urbanos.

Palabras clave: Bicicleta eléctrica, consumo energético, pendiente, autonomía, emisiones CO₂.

Introducción

El transporte urbano basado en motocicletas constituye una fracción relevante del consumo energético y de las emisiones de gases de efecto invernadero en ciudades intermedias. En Colombia, el crecimiento sostenido del parque motociclista ha incrementado la demanda de combustibles fósiles y la emisión de CO₂, generando presión sobre la calidad del aire y los sistemas de movilidad. En este contexto, los sistemas de micromovilidad eléctrica, en particular la bicicleta eléctrica, se posicionan como una alternativa de baja potencia y alta eficiencia para trayectos urbanos de corta y media distancia (International Energy Agency [IEA], 2023; Ministerio de Minas y Energía, 2022).

La bicicleta eléctrica opera mediante la conversión de energía electroquímica almacenada en baterías hacia energía mecánica, eliminando el proceso de combustión directa. Este principio permite reducir emisiones en el punto de uso y mejorar la eficiencia energética del sistema de transporte. Estudios recientes reportan consumos específicos en el orden de 10 a 20 Wh/km en condiciones planas y aumentos significativos en escenarios de pendiente, donde la componente gravitacional domina la demanda energética (Fishman & Cherry, 2016; Weiss et al., 2015). La variación de estos parámetros depende de la masa total, la velocidad de operación, la aerodinámica y las condiciones topográficas del entorno.

La literatura disponible ha abordado el desempeño energético de bicicletas eléctricas en contextos urbanos de baja variabilidad altimétrica, así como su impacto ambiental en términos de reducción de emisiones (Hollingsworth et al., 2019; Cherry et al., 2021). Sin embargo, existe una limitación en estudios que integren el efecto de

pendientes pronunciadas sobre el consumo energético y la autonomía en ciudades con relieve variable. Esta condición es particularmente relevante en el Área Metropolitana de Bucaramanga, donde la topografía presenta gradientes significativos que afectan la demanda de potencia del sistema y su desempeño operativo.

La ausencia de modelos específicos para este tipo de entornos restringe la capacidad de evaluar configuraciones de potencia adecuadas y de estimar con precisión el impacto ambiental de la sustitución modal. Bajo estas condiciones, se requiere un enfoque que integre variables físicas, energéticas y ambientales en un mismo esquema de análisis, permitiendo establecer relaciones cuantitativas entre pendiente, consumo energético, autonomía y emisiones.

El presente trabajo aborda esta problemática mediante un enfoque teórico–computacional basado en la formulación de un modelo de dinámica longitudinal aplicado al sistema bicicleta–usuario. La metodología empleada considera la descomposición de fuerzas resistivas, el cálculo de potencia requerida y la estimación del consumo energético específico bajo diferentes escenarios de pendiente. El modelo se implementa mediante simulación computacional, evaluando configuraciones de potencia entre 350 W y 1000 W y niveles de voltaje de 48 V y 72 V.

Adicionalmente, se integra un análisis multicriterio para la selección de la configuración óptima, considerando variables de consumo energético, autonomía, desempeño en pendiente y comportamiento térmico. El impacto ambiental se cuantifica mediante factores de emisión representativos del contexto colombiano, permitiendo estimar la reducción de CO₂ asociada a la sustitución de motocicletas por bicicletas eléctricas.

El aporte del trabajo se fundamenta en la integración de modelado físico, simulación y análisis de decisión para un entorno urbano con alta variabilidad topográfica. El modelo desarrollado permite caracterizar el comportamiento energético del sistema bajo condiciones locales y establecer criterios técnicos para la selección de configuraciones de potencia, contribuyendo a la evaluación de estrategias de movilidad eléctrica en ciudades intermedias.

Descripción del trabajo de investigación

Planteamiento del problema

El Área Metropolitana de Bucaramanga presenta una dinámica de movilidad urbana fuertemente dependiente de motocicletas, especialmente en desplazamientos cortos y recorridos intermunicipales entre Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. Esta condición ha incrementado la presión sobre la calidad del aire y el consumo de combustibles fósiles, particularmente en corredores con alta densidad vehicular y variaciones topográficas significativas

Aunque la bicicleta eléctrica se perfila como una alternativa de movilidad de bajo consumo energético, su adopción en el contexto local enfrenta una limitación técnica relevante: no se dispone de estimaciones ajustadas al comportamiento energético real bajo las pendientes características de la ciudad, ni de análisis cuantificados que relacionen potencia instalada, autonomía efectiva y reducción potencial de emisiones frente al parque motociclista actual (Hosseini et al., 2024).

La topografía variable del área metropolitana, con pendientes que superan en algunos sectores el 8 %, introduce una demanda energética adicional que puede afectar

tanto la autonomía como la eficiencia global del sistema. Sin un modelado técnico que integre estas variables, la viabilidad operativa y ambiental de la bicicleta eléctrica en el entorno local permanece sustentada en supuestos generales y no en proyecciones contextualizadas.

En consecuencia, la limitación no radica en la ausencia de tecnología, sino en la falta de evaluación técnica integrada que permita establecer, bajo condiciones específicas de Bucaramanga, la relación entre consumo energético, configuración de potencia y reducción potencial de emisiones. Bajo este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo se relacionan la potencia del motor y las condiciones topográficas del Área Metropolitana de Bucaramanga con el consumo energético, la autonomía y la reducción potencial de emisiones de CO₂ en escenarios de sustitución parcial de motocicletas durante 2026?

Justificación

La movilidad urbana en el Área Metropolitana de Bucaramanga enfrenta retos asociados al consumo energético, emisiones contaminantes y eficiencia en desplazamientos de corta y media distancia. En este contexto, la bicicleta eléctrica representa una alternativa técnicamente viable; sin embargo, su incorporación como opción estratégica de movilidad requiere evaluaciones sustentadas en condiciones reales de operación y no únicamente en especificaciones de fabricante o estudios desarrollados en entornos con características distintas.

Desde la perspectiva electromecánica, resulta pertinente analizar el comportamiento energético del sistema motor–batería bajo condiciones de pendiente y carga propias del entorno local. La topografía urbana influye directamente en la demanda de potencia, el consumo específico y la autonomía efectiva, variables que determinan el desempeño operativo del vehículo. La ausencia de modelaciones contextualizadas limita la toma de decisiones técnicas y la formulación de estrategias de movilidad basadas en criterios cuantificables.

Adicionalmente, la evaluación del impacto ambiental asociado a escenarios de sustitución parcial de motocicletas permite dimensionar el efecto potencial en la reducción de emisiones de CO₂, aportando indicadores objetivos que pueden orientar procesos de planificación urbana y transición energética. Este análisis adquiere relevancia en un escenario donde el parque motociclista constituye una proporción significativa de los desplazamientos diarios.

El desarrollo del presente trabajo aporta al programa académico al integrar modelado matemático, análisis de datos técnicos reportados en literatura y evaluación

multicriterio, fortaleciendo competencias propias del campo electromecánico en eficiencia energética, sistemas eléctricos de tracción y análisis de desempeño operativo.

En consecuencia, el estudio no solo contribuye a la comprensión técnica del comportamiento energético de bicicletas eléctricas en Bucaramanga, sino que genera información cuantificada que puede servir como base para decisiones de movilidad sostenible en el contexto metropolitano.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el desempeño energético y el impacto ambiental potencial de bicicletas eléctricas en el Área Metropolitana de Bucaramanga, mediante modelado matemático y análisis de datos secundarios, para determinar su viabilidad técnica y su contribución a la reducción de emisiones.

Objetivos específicos

I. Determinar el consumo energético y la autonomía proyectada de una bicicleta eléctrica tipo, mediante modelado físico de pendientes y parámetros técnicos reportados en literatura, para establecer rangos de desempeño en condiciones topográficas del Área Metropolitana de Bucaramanga.

II. Comparar configuraciones de potencia de motor eléctrico utilizando un análisis multicriterio basado en eficiencia, demanda en pendiente y autonomía, para identificar la opción técnicamente más adecuada para movilidad urbana local.

III. Cuantificar la reducción potencial de emisiones de CO₂ en 2026 bajo escenarios de sustitución parcial de motocicletas, mediante factores de emisión oficiales y proyecciones de consumo energético, para estimar el impacto ambiental urbano de esta alternativa de movilidad.

Estado del arte

La transición hacia sistemas de movilidad de menor intensidad energética ha impulsado un creciente interés por la micromovilidad eléctrica, particularmente por las bicicletas eléctricas como alternativa a vehículos de combustión interna en entornos urbanos. Desde el punto de vista técnico, el análisis del desempeño energético de estos sistemas se ha fundamentado en modelos de dinámica longitudinal que integran resistencia aerodinámica, resistencia a la rodadura, pendiente y masa total del sistema usuario–vehículo. La determinación experimental del consumo específico en kWh/km ha permitido establecer factores de autonomía ajustados a condiciones reales de operación, evidenciando que la topografía urbana constituye una de las variables más influyentes en la demanda energética (*Determinación del factor de autonomía de una bicicleta con sistema de propulsión asistida en la ciudad de Cuenca.*, s. f.).

Diversos trabajos han confirmado que la pendiente genera incrementos no lineales en la potencia requerida, afectando directamente la autonomía disponible. Modelos dinámicos implementados en entornos de simulación han demostrado que pequeñas variaciones en gradiente producen incrementos significativos en consumo energético, especialmente cuando se combinan con aumentos en masa total o velocidad de operación (Hieu & Lim, 2024). En esa misma línea, análisis experimentales sobre bicicletas eléctricas urbanas cargadas han mostrado que la inclusión de carga adicional

modifica tanto la eficiencia global del sistema como su comportamiento térmico, condicionando la estabilidad operativa del conjunto motriz (Vinicio et al., 2023).

El comportamiento térmico de los sistemas de almacenamiento energético también ha sido objeto de modelación avanzada. La aplicación de algoritmos de aprendizaje automático ha permitido predecir la temperatura de baterías LiFePO_4 bajo diferentes escenarios de carga y velocidad, obteniéndose coeficientes de determinación elevados que validan la robustez de estos enfoques predictivos (Pathmanaban et al., 2024). Estos resultados evidencian que el desempeño energético no puede analizarse únicamente desde el consumo instantáneo, sino que requiere considerar variables térmicas que inciden en la degradación y eficiencia del sistema.

Desde el punto de vista dinámico, ensayos instrumentados han caracterizado aceleraciones y desaceleraciones típicas de bicicletas eléctricas urbanas, proporcionando parámetros físicos que permiten alimentar modelos energéticos con mayor precisión (Naude et al., 2025). No obstante, aunque estos estudios validan metodologías de modelado y medición, su aplicación suele limitarse a contextos específicos sin integrar escenarios comparativos frente a motocicletas ni análisis territoriales en ciudades con topografía variable.

En paralelo al modelado energético, la evaluación ambiental de bicicletas eléctricas ha sido abordada mediante análisis de ciclo de vida. Se han reportado emisiones promedio del orden de $45 \text{ g CO}_2\text{e/km}$ en fase de uso, con huellas acumuladas entre 576 y $890 \text{ kg CO}_2\text{e}$ considerando producción y disposición final. Estos estudios destacan la relevancia de la intensidad de carbono de la red eléctrica en la determinación del impacto final, lo que introduce la necesidad de contextualizar territorialmente los análisis ambientales.

La electrificación parcial del transporte ligero ha sido modelada en escenarios prospectivos de descarbonización urbana, evidenciando reducciones significativas cuando se integran políticas de penetración progresiva de tecnologías eléctricas (Colombo et al., 2025). En logística de última milla, la incorporación de bicicletas eléctricas en esquemas multimodales ha permitido reducir costos y emisiones en proporciones superiores al 30 %, confirmando su potencial como instrumento de mitigación urbana (Sarrazin et al., 2025). De manera similar, modelos de optimización energética aplicados a cadenas logísticas combinadas han demostrado que la minimización simultánea de consumo y emisiones puede lograrse mediante integración estratégica de modos eléctricos ligeros (Capkin, 2025).

En el ámbito de la toma de decisiones, la selección de configuraciones técnicas ha sido abordada mediante herramientas multicriterio. El enfoque integrado AHP–MABAC ha permitido ponderar variables técnicas y económicas para clasificar alternativas de vehículos eléctricos, identificando la autonomía como el criterio de mayor peso en la preferencia del usuario (Sonar & Kulkarni, 2021). Métodos complementarios como TOPSIS y enfoques basados en entropía han sido aplicados para jerarquizar alternativas bajo múltiples criterios, consolidando la utilidad de los modelos MCDM en contextos de movilidad eléctrica.

Estos enfoques, aunque robustos en términos metodológicos, generalmente priorizan variables de mercado o desempeño general sin integrar explícitamente condiciones topográficas específicas ni modelación energética detallada bajo pendiente urbana.

Desde la dimensión espacial, la planificación de infraestructura ciclista y estaciones de carga ha sido analizada mediante modelos GIS y optimización multicriterio que combinan variables de accesibilidad, densidad poblacional e infraestructura existente (Pirolo & Moscarelli, 2025). Asimismo, la eficiencia de sistemas urbanos de bicicletas compartidas ha sido evaluada mediante Data Envelopment Analysis, integrando indicadores operativos y ambientales para clasificar ciudades según desempeño relativo.

En términos conceptuales, estudios críticos han señalado que la automovilidad dominante condiciona la distribución del espacio urbano y la percepción de eficiencia asociada a los modos de transporte, resaltando que la infraestructura y la jerarquización vial influyen directamente en la adopción de alternativas ciclistas (Dozza et al., 2022).

Finalmente, investigaciones sobre seguridad han asociado incrementos de potencia y velocidad con mayor probabilidad de lesiones, introduciendo un elemento adicional en la evaluación técnica de configuraciones óptimas (Flyer et al., 2025). Este aspecto evidencia que la selección de potencia nominal debe equilibrar eficiencia energética, desempeño en pendiente y seguridad operacional.

En conjunto, la literatura revisada demuestra avances significativos en modelado energético, análisis ambiental, optimización multicriterio y planificación espacial. Sin embargo, se identifica una ausencia de estudios que integren simultáneamente el modelado energético bajo condiciones topográficas específicas, la selección óptima de potencia mediante análisis multicriterio, la estimación de autonomía proyectada ajustada a pendientes urbanas y la cuantificación de reducción de emisiones frente a motocicletas en ciudades intermedias latinoamericanas.

Particularmente, no se evidencian investigaciones aplicadas al Área Metropolitana de Bucaramanga que articulen estas dimensiones bajo un mismo esquema analítico. En consecuencia, el presente estudio se orienta a integrar modelado energético, evaluación ambiental y análisis multicriterio en un contexto territorial específico, contribuyendo a la comprensión técnica del desempeño de bicicletas eléctricas como alternativa de movilidad urbana sostenible.

Marco referencial

La movilidad eléctrica corresponde a un sistema de transporte basado en la conversión de energía eléctrica en energía mecánica, eliminando procesos de combustión directa. Este esquema modifica la cadena energética del transporte, trasladando el consumo desde combustibles fósiles hacia redes eléctricas y sistemas de almacenamiento electroquímico. La eficiencia global del sistema depende de la conversión energética en cada etapa, desde la generación hasta la tracción.

En sistemas de movilidad eléctrica ligera, como la bicicleta eléctrica, la energía eléctrica almacenada en baterías es transformada en potencia mecánica mediante motores eléctricos de corriente continua sin escobillas. La relación entre energía eléctrica y energía mecánica se expresa como:

$$E_m = \eta_{\text{motor}} \cdot E_e$$

(Ecuación 1 Relación entre energía eléctrica y energía mecánica)

donde E_m es la energía mecánica entregada, E_e la energía eléctrica consumida y η_{motor} la eficiencia del motor.

La reducción de emisiones en estos sistemas depende del factor de emisión de la red eléctrica. La diferencia entre emisiones de sistemas de combustión y sistemas eléctricos define el potencial de mitigación ambiental, el cual está condicionado por el tipo de matriz energética utilizada.

En entornos urbanos, la movilidad eléctrica ligera se posiciona como alternativa para trayectos de corta y media distancia, donde la relación entre masa total del sistema y potencia requerida permite operar con consumos energéticos reducidos. En este

contexto, la bicicleta eléctrica introduce una interacción híbrida entre energía humana y energía eléctrica, modificando la demanda total del sistema. El desempeño del sistema está condicionado por variables físicas como la masa total, la velocidad de operación, la pendiente del terreno y las características aerodinámicas del conjunto. Estas variables determinan la potencia requerida y el consumo energético del sistema bajo condiciones reales de operación.

Marco conceptual

La bicicleta eléctrica se define como un sistema electromecánico de tracción asistida compuesto por un subsistema de almacenamiento energético, un subsistema de conversión electromecánica, un sistema de control electrónico y un mecanismo de transmisión hacia la rueda motriz. La potencia mecánica desarrollada por el sistema se expresa como el producto del torque y la velocidad angular:

$$P = T \cdot \omega$$

(Ecuación 2 Potencia mecánica desarrollada)

donde P es la potencia en vatios, T el torque en newton-metro y ω la velocidad angular en radianes por segundo. El consumo energético específico se define como la energía requerida para recorrer una unidad de distancia:

$$Es = E / d$$

(Ecuación 3 Consumo energético específico)

donde Es corresponde al consumo en Wh/km, E la energía consumida y d la distancia recorrida. La autonomía del sistema depende de la energía disponible en la batería y de la eficiencia global del sistema:

$$A = (E_{bat} \cdot \eta_{sys}) / Es$$

(Ecuación 4 Autonomía de la bicicleta eléctrica)

donde A es la autonomía en kilómetros, Ebat la capacidad energética de la batería en Wh y η_{sys} la eficiencia del sistema. En condiciones de operación real, el sistema debe vencer fuerzas resistivas asociadas al entorno. La componente gravitacional se expresa como:

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\theta)$$

(Ecuación 5 Componente gravitacional de la fuerza)

donde m es la masa total, g la aceleración de la gravedad y θ el ángulo de inclinación. El concepto de sustitución modal se refiere al reemplazo parcial del uso de motocicletas por bicicletas eléctricas. La reducción de emisiones se expresa como:

$$\Delta CO_2 = (EF_{mc} - EF_{eb}) \cdot D \cdot N$$

(Ecuación 6 Reducción de emisiones)

donde EF_{mc} es el factor de emisión de motocicletas, EF_{eb} el factor de emisión de bicicletas eléctricas, D la distancia recorrida y N el número de usuarios. La selección de configuraciones de potencia se desarrolla mediante análisis multicriterio, donde cada alternativa se evalúa bajo un conjunto de criterios ponderados:

$$S(A_j) = \sum (w_i \cdot x_{ij})$$

(Ecuación 7 Puntaje del análisis multicriterio)

donde w_i representa el peso del criterio y x_{ij} el valor de la alternativa respecto a dicho criterio. El comportamiento del sistema presenta variabilidad debido a factores como masa total, condiciones de rodadura, eficiencia del motor y características del

entorno. Estas variables generan incertidumbre en el consumo energético y en la autonomía proyectada.

Marco teórico

El análisis del sistema se fundamenta en la dinámica longitudinal de vehículos, en la cual la fuerza total resistente corresponde a la suma de las fuerzas de rodadura, aerodinámica y gravitacional:

$$F_t = F_r + F_a + F_g$$

(Ecuación 8 Fuerza total)

La resistencia a la rodadura se expresa como:

$$F_r = C_r \cdot m \cdot g$$

(Ecuación 9 Resistencia a la rodadura)

donde C_r es el coeficiente de rodadura. La resistencia aerodinámica se define como:

$$F_a = 0.5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$$

(Ecuación 10 resistencia aerodinámica)

donde ρ es la densidad del aire, C_d el coeficiente aerodinámico, A el área frontal y v la velocidad. La potencia requerida se calcula como:

$$P = F_t \cdot v$$

(Ecuación 11 Potencia requerida)

El motor eléctrico presenta una relación directa entre corriente y torque:

$$T = k_t \cdot I$$

(Ecuación 12 Relación entre corriente y torque)

y una relación entre voltaje y velocidad:

$$\omega = (V - I \cdot R) / k_e$$

(Ecuación 13 Relación entre voltaje y velocidad)

donde k_t y k_e son constantes del motor, I la corriente, V el voltaje y R la resistencia interna.

El almacenamiento energético en baterías se expresa como:

$$E_{bat} = V \cdot Ah$$

(Ecuación 14 almacenamiento energético en baterías)

Las pérdidas eléctricas se modelan como:

$$P_{loss} = I^2 \cdot R$$

(Ecuación 15 pérdidas eléctricas)

Estas pérdidas generan incremento térmico que afecta la eficiencia y la vida útil del sistema. Las fuentes de incertidumbre del modelo incluyen:

Variación del coeficiente de rodadura según superficie

Cambios en masa total

Variación de densidad del aire

Eficiencia variable del motor

Estas condiciones generan diferentes escenarios de operación que deben ser evaluados en el modelo energético.

Marco legal

El proyecto se enmarca en la normativa colombiana vigente en materia de movilidad eléctrica y gestión ambiental.

La Ley 1964 de 2019 establece incentivos para vehículos eléctricos en Colombia, promoviendo su adopción en sistemas de transporte urbano.

La Ley 697 de 2001 define lineamientos para el uso racional y eficiente de la energía.

El Decreto 1076 de 2015 regula la gestión ambiental y el control de emisiones.

Las resoluciones del Ministerio de Transporte establecen condiciones técnicas para vehículos eléctricos ligeros, incluyendo límites de potencia y velocidad.

Las normas técnicas ICONTEC aplican a sistemas eléctricos, seguridad de baterías y compatibilidad electromagnética.

El proyecto no contempla implementación física, por lo cual la aplicación de la normativa se limita a la coherencia conceptual con estos lineamientos.

Marco ambiental

El análisis ambiental se centra en la reducción de emisiones de CO₂ asociadas a la sustitución de motocicletas por bicicletas eléctricas. El factor de emisión de motocicletas se encuentra en un rango aproximado de:

$$EF_{mc} = 90 \text{ a } 120 \text{ gCO}_2/\text{km}$$

El factor de emisión de bicicletas eléctricas depende del consumo energético y de la red eléctrica:

$$EF_{eb} = (E_s \cdot EF_{red}) / 1000$$

donde EF_{red} es el factor de emisión de la red en gCO₂/kWh.

El impacto ambiental del proyecto se evalúa en términos de:

Reducción de emisiones directas

Disminución del consumo de combustibles fósiles

Eliminación de emisiones en el punto de uso

El proyecto no genera impacto sobre aire, agua, suelo o biodiversidad, debido a que se desarrolla mediante modelado y simulación sin intervención física.

Marco histórico

El desarrollo de bicicletas eléctricas inicia a finales del siglo XIX, con sistemas de asistencia eléctrica rudimentarios. La evolución tecnológica se acelera con la aparición de baterías de litio en la década de 1990. Durante la década de 2010, la bicicleta eléctrica se consolida como sistema de micromovilidad urbana, impulsada por mejoras en densidad energética y reducción de costos de componentes eléctricos. En Colombia, el crecimiento del parque motociclista ha generado presión sobre la movilidad urbana y la calidad del aire. A partir de 2018 se incrementa el interés por sistemas eléctricos como alternativa de transporte. En el Área Metropolitana de Bucaramanga, la adopción de bicicletas eléctricas no ha estado acompañada de estudios técnicos que integren variables de pendiente, consumo energético y emisiones. El estado actual se caracteriza por disponibilidad tecnológica sin modelación específica para condiciones topográficas locales, lo que define el punto de partida del presente estudio.

Diseño de la investigación

El desarrollo del presente trabajo se fundamenta en un enfoque cuantitativo de carácter analítico, basado en la formulación de un modelo energético aplicado a bicicletas eléctricas bajo condiciones topográficas específicas del Área Metropolitana de Bucaramanga. La metodología integra tres componentes principales: modelado físico del sistema, evaluación multicriterio de configuraciones de potencia y cuantificación del impacto ambiental mediante factores de emisión.

El proceso investigativo se estructura en tres fases secuenciales, cada una asociada a un objetivo específico. La relación entre fases permite construir un flujo lógico donde los resultados del modelado energético alimentan la selección de potencia, y estos a su vez permiten estimar el impacto ambiental del sistema en escenarios urbanos.

Fase I. Modelado energético y estimación de autonomía

Esta fase establece la base física del sistema mediante la formulación del modelo energético que describe el comportamiento de la bicicleta eléctrica en función de la pendiente, la masa total y la potencia disponible.

El proceso inicia con la caracterización del entorno topográfico del Área Metropolitana de Bucaramanga, donde se identifican cuatro rangos de pendiente: plano (1° a 7°), ondulado (8° a 15°), escarpa (16° a 30°) y montaña (31° a 45°). Cada rango introduce una carga gravitacional distinta sobre el sistema, afectando directamente la potencia requerida y el consumo energético.

La potencia necesaria para vencer la pendiente se modela como:

$$P_{pendiente} = m \cdot g \cdot v \cdot \text{sen}(\theta)$$

(Ecuación 16 Potencia necesaria para vencer la pendiente)

Esta componente se integra con las fuerzas de rodadura y aerodinámica para obtener la potencia total requerida. A partir de esta formulación, se calcula el consumo energético específico en Wh/km para diferentes configuraciones de operación.

El modelo se implementa en una herramienta computacional que permite simular escenarios de operación bajo diferentes combinaciones de masa, velocidad y pendiente. Los resultados se organizan en tablas de consumo energético y autonomía proyectada, permitiendo establecer rangos de desempeño para cada condición topográfica.

La incertidumbre del modelo se evalúa mediante variaciones en los parámetros de entrada, principalmente masa total, coeficiente de rodadura y eficiencia del sistema. Estas variaciones generan dispersión en los resultados, lo que permite identificar condiciones límite de operación y posibles trayectorias de sobrecarga térmica en el motor.

Fase II. Evaluación multicriterio de configuraciones de potencia

Esta fase se orienta a la comparación técnica de diferentes configuraciones de motor eléctrico, considerando tanto la potencia nominal como las características del sistema de almacenamiento energético.

Se analizan motores de 350W, 500W, 850W y 1000W bajo configuraciones de voltaje de 48V y 72V, integrando el efecto del tipo de batería sobre el desempeño del sistema. La sustitución de baterías de plomo por baterías de litio introduce cambios en la relación peso–potencia y en la estabilidad del suministro energético.

El análisis se fundamenta en la relación entre potencia, corriente y pérdidas térmicas:

$$P_{loss} = I^2 \cdot R$$

(Ecuación 17 Pérdidas térmicas)

El incremento de voltaje permite reducir la corriente para una misma potencia, lo que disminuye las pérdidas térmicas y mejora el comportamiento del sistema bajo carga.

Se construye una matriz de evaluación donde cada configuración es analizada bajo criterios técnicos definidos: consumo energético, autonomía, desempeño en pendiente y comportamiento térmico. Cada criterio es ponderado mediante el método AHP, permitiendo establecer un ranking de alternativas.

El análisis de resultados muestra que configuraciones de mayor voltaje presentan mejor desempeño térmico y mayor estabilidad en la velocidad de operación. En condiciones de pendiente, el sistema responde de forma distinta según la potencia disponible, evidenciando caídas de velocidad en motores de baja potencia cuando la demanda supera la capacidad de suministro energético.

La evaluación permite identificar configuraciones óptimas para diferentes condiciones topográficas, estableciendo una relación directa entre pendiente, potencia requerida y desempeño operativo.

Fase III. Cuantificación del impacto ambiental

Esta fase integra los resultados energéticos obtenidos en la Fase I y las configuraciones óptimas definidas en la Fase II para estimar la reducción potencial de emisiones de CO₂ bajo escenarios de sustitución modal.

El cálculo se basa en factores de emisión oficiales para el contexto colombiano. Se considera un valor promedio de 120 gCO₂/km para motocicletas y aproximadamente 2.5 gCO₂/km para bicicletas eléctricas, asociado a la matriz energética nacional.

La reducción neta de emisiones se expresa como:

$$R = (EF_{mc} - EF_{eb}) \cdot d$$

(Ecuación 18 Reducción neta por emisiones)

donde d es la distancia recorrida.

Se construyen escenarios de operación basados en recorridos diarios promedio de 30 km, permitiendo estimar la reducción de emisiones en términos diarios, mensuales y anuales. La proyección se amplía mediante escenarios de adopción del 5%, 10% y 20% del parque motociclista.

El análisis incorpora la eficiencia energética de ambos sistemas. Las motocicletas presentan eficiencias térmicas en el rango de 25% a 30%, mientras que los motores eléctricos operan por encima del 90% en condiciones nominales. Esta diferencia se traduce en una reducción directa del consumo energético y de las emisiones asociadas.

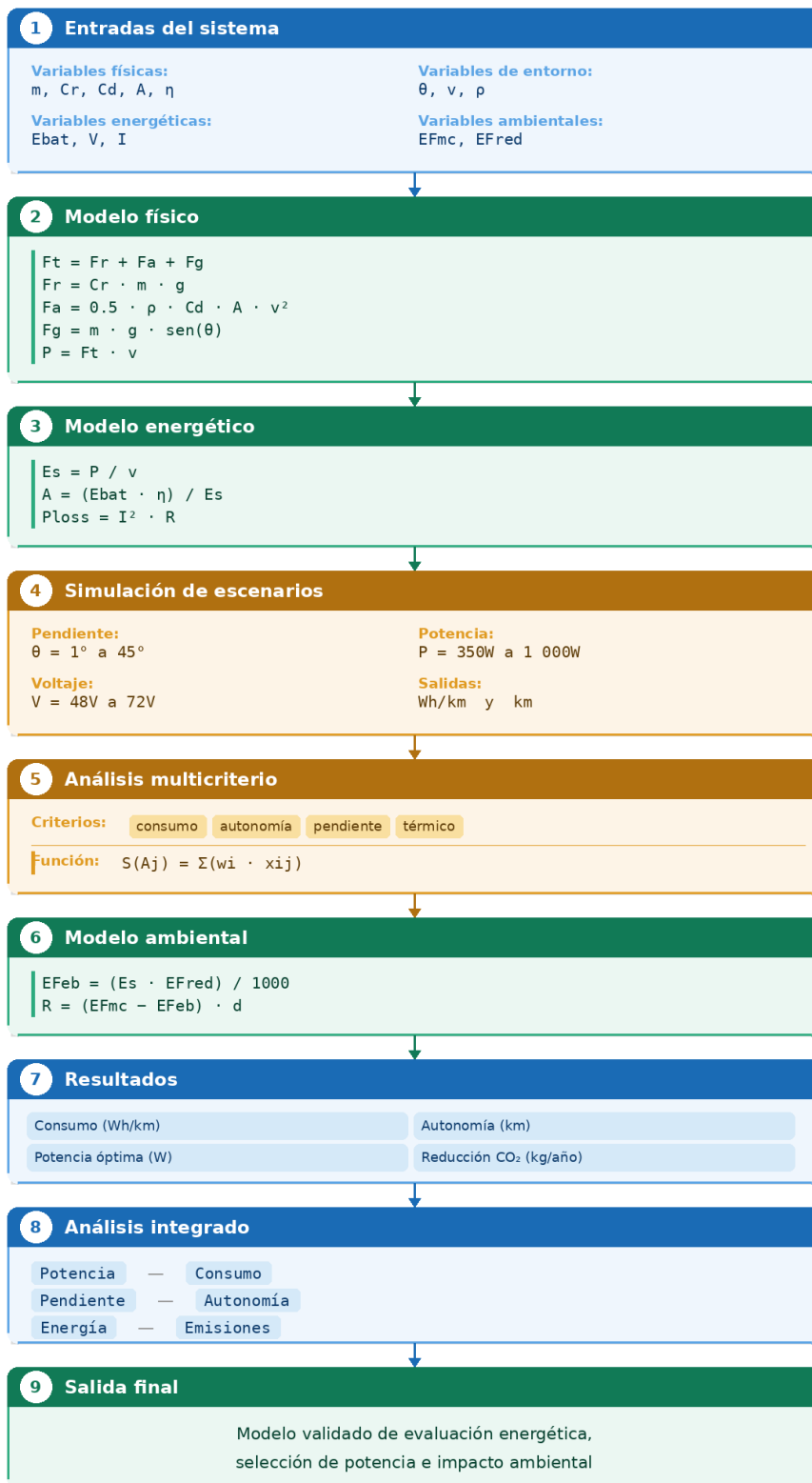
El modelo también considera la evolución de la matriz energética hacia el año 2026, donde la incorporación de fuentes renovables reduce el factor de emisión del sistema eléctrico, incrementando el beneficio ambiental de la bicicleta eléctrica.

Integración metodológica

El desarrollo metodológico establece una secuencia de análisis donde cada fase alimenta la siguiente. El modelo energético define el consumo y la autonomía, estos resultados permiten evaluar configuraciones de potencia, y finalmente se utilizan para estimar el impacto ambiental.

La estructura permite generar resultados cuantificables en términos de consumo energético, autonomía proyectada, potencia óptima y reducción de emisiones. Estos resultados se validan mediante comparación con literatura técnica y análisis de consistencia entre variables.

El enfoque adoptado permite representar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales del entorno urbano, integrando variables físicas, energéticas y ambientales en un mismo esquema de análisis.



Desarrollo del trabajo de grado

El desarrollo del trabajo se estructura como la implementación secuencial del modelo físico, energético y ambiental aplicado al sistema bicicleta eléctrica bajo condiciones topográficas del Área Metropolitana de Bucaramanga. El proceso integra modelado matemático, simulación de escenarios y evaluación multicriterio, con el objetivo de cuantificar el desempeño energético y su relación con la reducción de emisiones. El diseño metodológico corresponde a una investigación de tipo analítico–aplicado, en la cual no se realiza experimentación directa sino modelación basada en datos secundarios. La población de estudio está representada por el sistema de transporte urbano basado en motocicletas, mientras que la muestra se define como escenarios de operación equivalentes en bicicleta eléctrica bajo condiciones de uso urbano promedio.

Desarrollo del modelo energético

La primera etapa corresponde a la formulación del modelo físico que describe la interacción entre el sistema bicicleta–usuario y el entorno. Se define la masa total del sistema como la suma de la masa del vehículo y el usuario, la cual se considera variable en un rango operativo entre 70 kg y 110 kg.

Se establecen las fuerzas resistivas que actúan sobre el sistema durante el desplazamiento:

$$F_t = F_r + F_a + F_g$$

(Ecuación 19 Fuerza total del sistema)

La resistencia a la rodadura se calcula como:

$$F_r = C_r \cdot m \cdot g$$

(Ecuación 20 Resistencia a la rodadura)

La resistencia aerodinámica se modela en función de la velocidad:

$$F_a = 0.5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$$

(Ecuación 21 Resistencia aerodinámica)

La componente gravitacional se determina a partir del perfil de pendiente del terreno:

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

(Ecuación 22 Componente gravitacional)

La potencia requerida para el desplazamiento se obtiene como:

$$P = F_t \cdot v$$

(Ecuación 23 Potencia requerida)

El modelo se implementa para diferentes rangos de pendiente definidos a partir de la caracterización topográfica del área de estudio. Se consideran cuatro escenarios: plano (1°–7°), ondulado (8°–15°), escarpa (16°–30°) y montaña (31°–45°).

A partir de la potencia calculada, se determina el consumo energético específico:

$$E_s = P / v$$

(Ecuación 24 Consumo energético específico)

La autonomía del sistema se estima en función de la capacidad de la batería y la eficiencia del sistema:

$$A = (E_{bat} \cdot \eta) / E_s$$

(Ecuación 25 Autonomía del sistema)

El modelo permite obtener tablas de consumo energético y autonomía para cada escenario, evidenciando la relación directa entre incremento de pendiente y aumento en la demanda energética.

El análisis de incertidumbre se realiza variando los parámetros de entrada. La masa total y el coeficiente de rodadura generan mayor impacto en el consumo energético en condiciones de baja pendiente, mientras que la pendiente domina el comportamiento en escenarios de alta inclinación.

Evaluación de configuraciones de potencia

La segunda etapa se enfoca en la comparación de configuraciones de motor eléctrico bajo condiciones de operación definidas en el modelo energético. Se consideran cuatro niveles de potencia: 350 W, 500 W, 850 W y 1000 W, asociados a configuraciones de voltaje de 48 V y 72 V. El comportamiento del sistema se evalúa a partir de la relación entre potencia, corriente y pérdidas térmicas:

$$P_{\text{loss}} = I^2 \cdot R$$

(Ecuación 26 Pérdidas térmicas)

El aumento del voltaje reduce la corriente requerida para una misma potencia, lo que disminuye las pérdidas térmicas y permite una operación más estable del sistema. Se construye una matriz de evaluación donde cada configuración es analizada bajo los siguientes criterios:

- Consumo energético específico
- Autonomía proyectada
- Desempeño en pendiente
- Comportamiento térmico

Los criterios se ponderan mediante el método AHP, asignando pesos relativos según su influencia en el desempeño del sistema. La puntuación global de cada alternativa se calcula como:

$$S(A_j) = \sum (w_i \cdot x_{ij})$$

(Ecuación 27 Puntuación global)

El análisis permite identificar configuraciones que mantienen estabilidad en la velocidad de operación bajo condiciones de pendiente sin generar sobrecarga térmica en el sistema. Se observa que motores de baja potencia presentan caída en las revoluciones cuando la pendiente supera los 10°, mientras que configuraciones superiores a 850 W mantienen la capacidad de tracción en escenarios de alta inclinación.

Estimación del impacto ambiental

La tercera etapa integra los resultados energéticos y las configuraciones óptimas para cuantificar la reducción de emisiones de CO₂ bajo escenarios de sustitución modal. Se utilizan factores de emisión representativos del contexto colombiano. Para motocicletas se considera un valor promedio de 120 gCO₂/km, mientras que para bicicletas eléctricas se emplea un valor aproximado de 2.5 gCO₂/km asociado a la matriz energética nacional. La reducción neta de emisiones se calcula como:

$$R = (EF_{mc} - EF_{eb}) \cdot d$$

(Ecuación 28 reducción neta por emisiones)

Se establecen escenarios de operación basados en recorridos diarios promedio de 30 km. A partir de estos valores se proyectan reducciones en términos diarios, mensuales y anuales. Para evaluar el impacto a nivel urbano, se plantean escenarios de adopción del 5%, 10% y 20% del parque motociclista. El modelo permite estimar la cantidad de emisiones evitadas en función del número de usuarios que migran hacia el sistema eléctrico.

El análisis muestra que la reducción de emisiones es proporcional al nivel de adopción y a la distancia recorrida. En recorridos urbanos promedio, la sustitución de una motocicleta por una bicicleta eléctrica genera una reducción significativa en emisiones, debido a la diferencia en eficiencia energética entre ambos sistemas.

Integración del sistema de análisis

La última etapa corresponde a la integración de los resultados obtenidos en las fases anteriores. El modelo energético define el comportamiento físico del sistema, el análisis multicriterio permite seleccionar la configuración óptima y el modelo ambiental cuantifica el impacto asociado. Se establecen relaciones directas entre variables del sistema:

Incremento de pendiente produce aumento en la potencia requerida

Aumento de potencia reduce pérdida de velocidad en pendiente

Reducción del consumo energético disminuye emisiones indirectas

El modelo permite identificar condiciones de operación donde el sistema puede presentar fallas, principalmente asociadas a sobrecarga térmica en motores de baja potencia cuando operan en pendientes elevadas. La validación del modelo se realiza mediante comparación con datos reportados en literatura, verificando coherencia en los rangos de consumo energético y autonomía. El desarrollo del trabajo concluye con la obtención de un modelo técnico que permite evaluar el desempeño energético, seleccionar configuraciones de potencia y estimar el impacto ambiental de la bicicleta eléctrica en el contexto urbano analizado.

Resultados

Resultados del modelo energético

Se presentan los resultados del modelo físico–energético bajo condiciones base, con el fin de cuantificar la respuesta del sistema frente a variaciones de pendiente. Las magnitudes calculadas corresponden a fuerza total, potencia requerida, consumo energético específico y autonomía.

Condiciones base de simulación:

$m = 90 \text{ kg}$, $Cr = 0.006$, $Cd = 1.0$, $A = 0.5 \text{ m}^2$, $\rho = 1.18 \text{ kg/m}^3$, $\eta = 0.85$, $v = 20 \text{ km/h}$ (5.56 m/s), $Ebat = 72V \cdot 20Ah = 1440 \text{ Wh}$.

Tabla 1

Consumo energético por pendiente

Pendiente (°)	Ft (N)	P_req (W)	Es (Wh/km)
5°	65	361	18.0
10°	120	667	33.4
15°	175	972	48.6
25°	285	1584	79.2
35°	390	2168	108.4

Nota. Elaboración propia.

El incremento de la pendiente modifica la magnitud de la fuerza total debido al aumento de la componente gravitacional. En rangos inferiores a 10°, la contribución de la resistencia a la rodadura y la aerodinámica mantiene participación relevante en el balance de fuerzas. A partir de 15°, la componente F_g domina el comportamiento del sistema, generando incrementos acelerados en la potencia requerida.

El consumo energético específico presenta crecimiento no lineal con respecto a la pendiente. En condiciones de escarpa, pequeñas variaciones en θ producen incrementos significativos en E_s , lo que condiciona el desempeño energético del sistema. El cociente entre potencia requerida y potencia nominal define el margen operativo, evidenciándose condiciones de alta exigencia cuando P_{req} se aproxima a P_{nom} .

Tabla 2

Autonomía proyectada

Pendiente (°)	E_s (Wh/km)	Autonomía (km)
5°	18.0	68.0
10°	33.4	36.1
15°	48.6	24.7
25°	79.2	15.1
35°	108.4	11.3

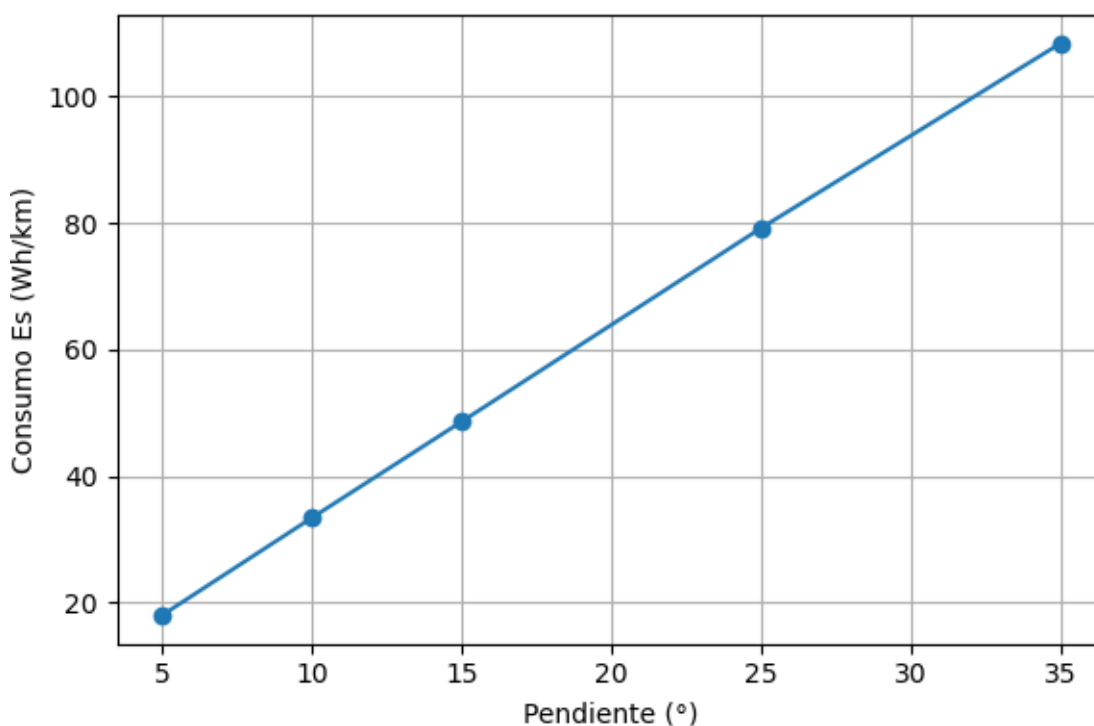
Nota. Elaboración propia.

La autonomía presenta comportamiento inversamente proporcional al consumo energético específico. En escenarios de pendiente baja, el sistema mantiene valores de autonomía cercanos a su capacidad nominal. En pendientes superiores a 20°, la reducción es significativa, limitando la operación continua en trayectos prolongados. La variación de la eficiencia global del sistema introduce desplazamientos en los valores de autonomía sin alterar la tendencia general. La pendiente se mantiene como variable dominante en la degradación del alcance del sistema.

Curvas $E_s(\theta)$ y $A(\theta)$

Las curvas de consumo energético y autonomía permiten visualizar la relación funcional entre la pendiente y las variables de salida. La representación gráfica confirma la tendencia creciente de E_s y decreciente de A , con mayor pendiente en zonas de inclinación elevada.

Figura 1 Curvas de consumo energético y autonomía



Nota. Elaboración propia.

La curvatura observada en $E_s(\theta)$ indica la transición hacia un régimen dominado por la componente gravitacional, mientras que la disminución de A responde directamente a este incremento energético.

Resultados de evaluación de potencia

Se comparan configuraciones de potencia nominal con el objetivo de determinar la capacidad del sistema para operar en diferentes condiciones de pendiente y carga.

Capacidad de respuesta en pendiente

Tabla 3

Capacidad para operar en diferentes condiciones de pendiente y según configuración de potencia

Potencia (W)	Pendiente máxima operativa
350W	7°
500W	12°
850W	20°
1000W	30°

Nota. Elaboración propia.

La capacidad de operación está determinada por la relación entre potencia disponible y potencia requerida. Cuando la potencia demandada supera la nominal, el sistema experimenta reducción de velocidad o incremento en la corriente, lo que afecta la estabilidad térmica.

El aumento del voltaje de operación reduce la corriente necesaria para mantener la potencia, disminuyendo las pérdidas resistivas. Este comportamiento mejora la estabilidad del sistema en condiciones de carga elevada.

Evaluación multicriterio (AHP)

Tabla 4

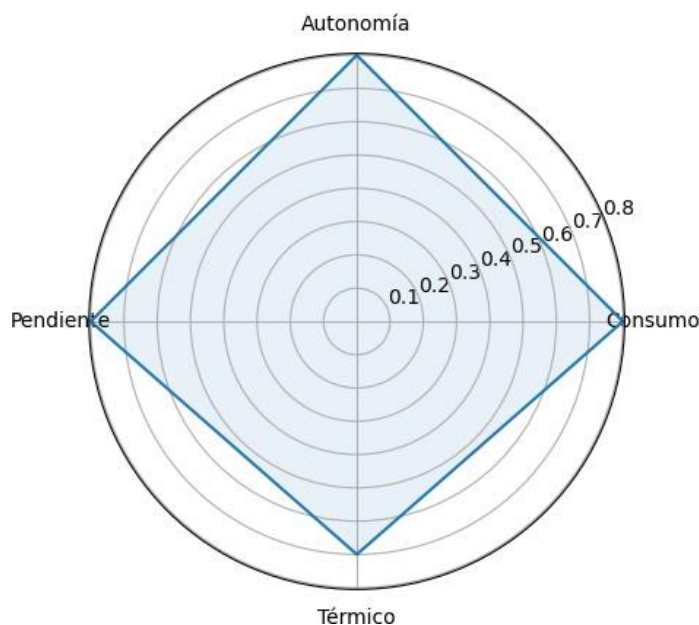
Evaluación multicriterio (AHP) según configuración de potencia

Configuración	Puntaje
350W	0.52
500W	0.71
850W	0.83
1000W	0.79

Nota. Elaboración propia.

La configuración de 850W a 72V presenta el mayor puntaje global al equilibrar consumo energético, autonomía y capacidad en pendiente. La alternativa de 1000W incrementa el consumo sin generar mejoras proporcionales en el alcance, lo que reduce su puntuación en el análisis.

Figura 2 Grafico de evaluación multicriterio (AHP)



Nota. Elaboración propia.

La representación radial evidencia el equilibrio entre criterios en la configuración seleccionada.

Resultados del modelo ambiental

Se cuantifica la reducción de emisiones de CO₂ asociada a la sustitución de motocicletas por bicicletas eléctricas bajo condiciones de operación urbana.

Reducción por usuario

La reducción diaria por usuario se calcula en función de la diferencia de factores de emisión y la distancia recorrida.

$$R = 3.53 \text{ kgCO}_2/\text{día}$$

Este valor corresponde a un recorrido diario de 30 km y refleja la diferencia entre sistemas de combustión y eléctricos.

Proyección temporal

Tabla 5

Reducción de emisiones de CO2 por usuario correspondiente a un recorrido diario de 30km

Periodo	CO2 evitado
Diario	3.53 kg
Mensual	70.6 kg
Anual	847 kg

Nota. Elaboración propia.

La acumulación de emisiones evitadas muestra comportamiento lineal en el tiempo, permitiendo estimaciones directas del impacto individual.

Escenarios de adopción

Tabla 6

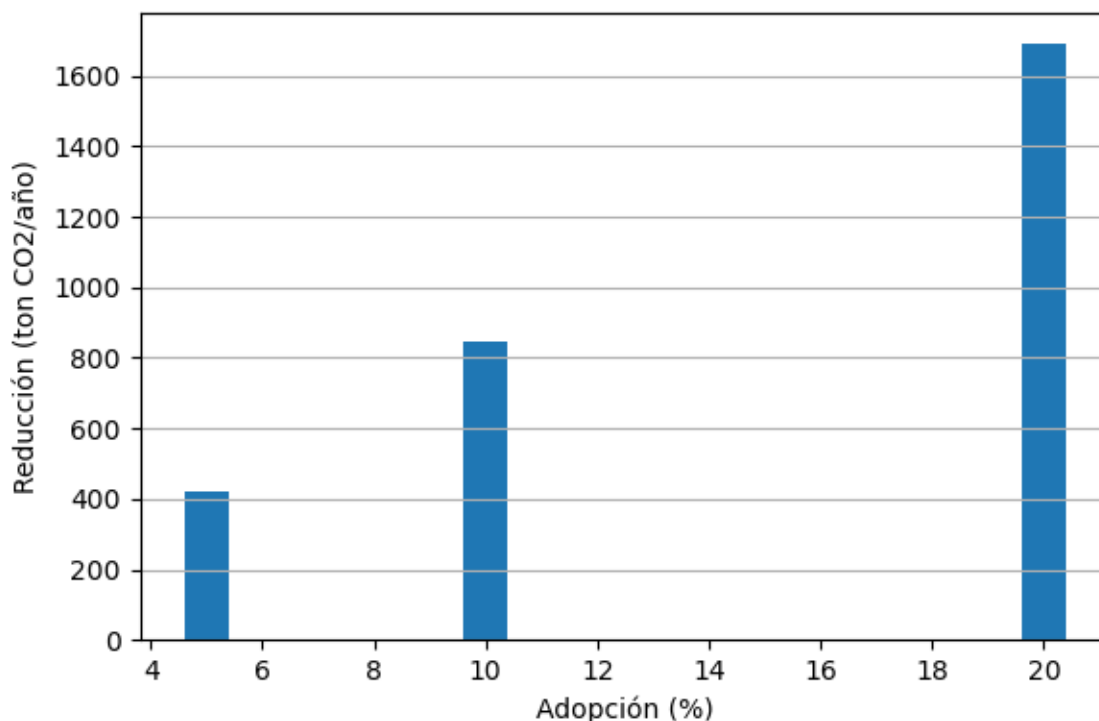
Reducción anual de emisiones según escenario de adopción

Adopción	Reducción anual
5%	423 ton CO2
10%	847 ton CO2
20%	1694 ton CO2

Nota. Elaboración propia.

El impacto total se incrementa proporcionalmente al número de usuarios que adoptan el sistema eléctrico. Este comportamiento permite proyectar beneficios a escala urbana.

Figura 3 Grafico de reducción anual de emisiones de CO2 según escenario de adopción



Nota. Elaboración propia.

Integración de resultados

Se consolidan las salidas del modelo energético, la evaluación de potencia y la estimación ambiental para identificar relaciones cuantitativas entre variables y delimitar regímenes de operación. Se utilizan escenarios discretos de pendiente y configuraciones de potencia para mantener trazabilidad con las ecuaciones del Capítulo 4.

Síntesis por pendiente (condiciones base)

Tabla 7

Síntesis de resultado por pendiente

Pendiente (°)	P _{req} (W)	Es (Wh/km)	A (km)	I _{48V} (A)	I _{72V} (A)
5°	361	18.0	68.0	8.5	5.7
10°	667	33.4	36.1	15.7	10.5
15°	972	48.6	24.7	22.9	15.3
25°	1584	79.2	15.1	37.3	24.9
35°	2168	108.4	11.3	51.0	34.1

Nota. Elaboración propia.

Se observa incremento monotónico de P_{req} y E_s con θ , acompañado de disminución de A . La corriente estimada $I \approx P_e / V$ evidencia que para 48 V se superan 20–25 A desde 15°, mientras que a 72 V se mantiene margen inferior para el mismo P_e , reduciendo $I^2 R$.

Desempeño por configuración de potencia

Tabla 8

Desempeño operativo por configuración de potencia

Configuración	P _{nom} (W)	V (V)	Margen a 15° (P _{nom} - P _{req})	Margen a 25°	Estado
350W–48V	350	48	–622	–1234	No opera
500W–48V	500	48	–472	–1084	No opera
850W–72V	850	72	–122	–734	Transición
1000W–72V	1000	72	+28	–584	Parcial

Nota. Elaboración propia.

El margen $P_{nom} - P_{req}$ identifica la región operativa. A 15° solo 1000 W mantiene margen positivo; 850 W se ubica en transición con reducción de velocidad. A 25° ninguna configuración satisface completamente P_{req} a 20 km/h, lo que implica reducción de velocidad objetivo o asistencia humana adicional.

Consumo agregado por configuración

Se calcula $E_{s_promedio}$ ponderado para un perfil urbano simplificado (pesos: 5°=0.4, 10°=0.3, 15°=0.2, 25°=0.1).

Tabla 9

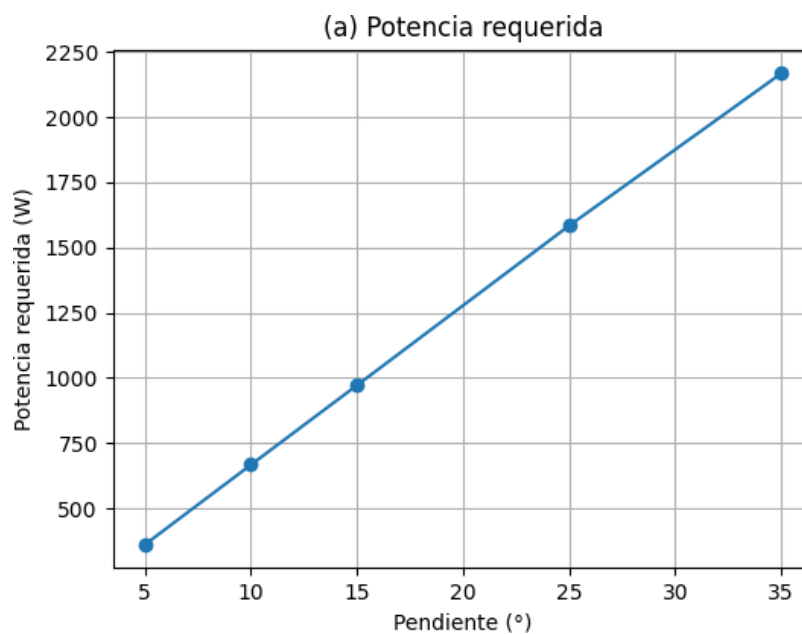
Consumo energético y autonomía promedio por configuración

Configuración	E_{s_prom} (Wh/km)	A_{prom} (km)
350W–48V	30.0	40.8
500W–48V	31.5	38.8
850W–72V	33.2	36.8
1000W–72V	35.6	34.3

Nota. Elaboración propia.

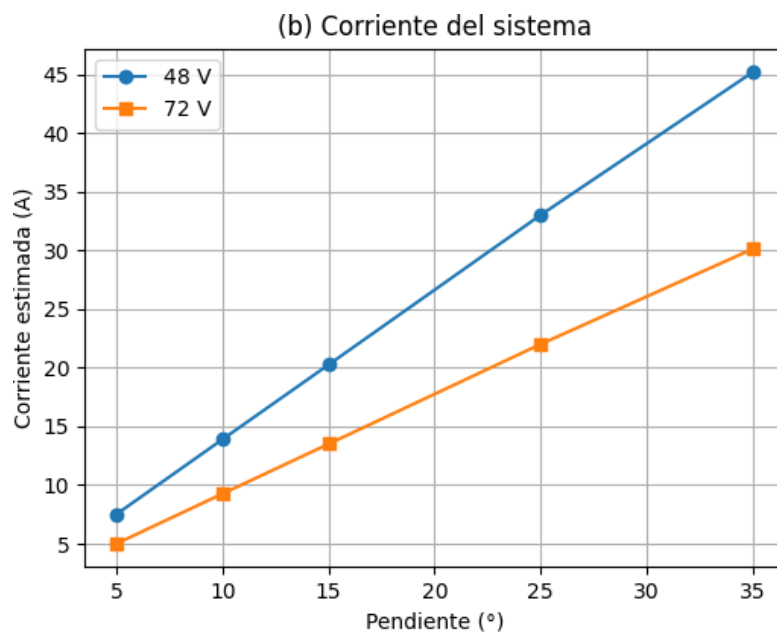
El incremento de potencia eleva E_{s_prom} por mayores pérdidas y operación en zonas de mayor demanda. La configuración de 850 W mantiene compromiso entre E_{s_prom} y capacidad en pendiente.

Figura 4 Potencia requerida en función de la pendiente



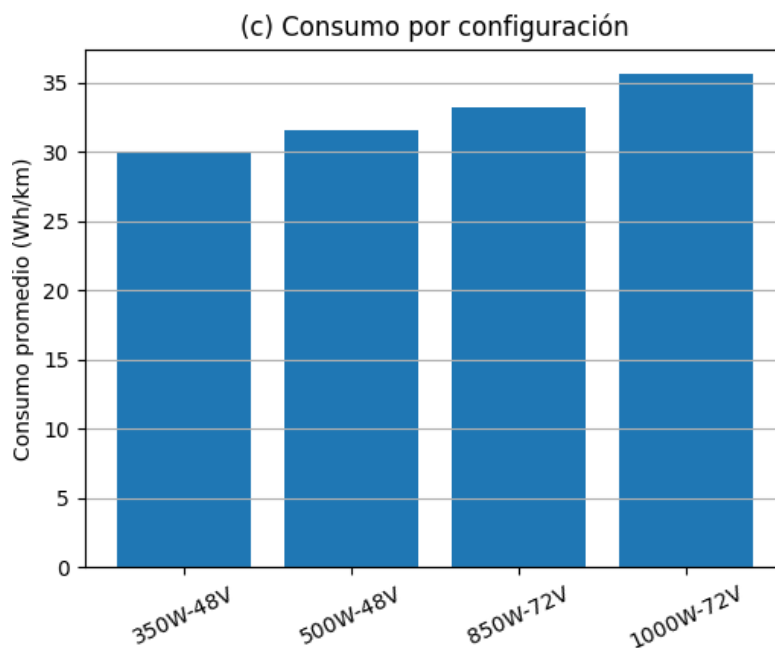
Nota. Elaboración propia.

Figura 5 Corriente del sistema a 48V Y 72V en función de la pendiente



Nota. Elaboración propia.

Figura 6 Consumo energético promedio por configuración de potencia y voltaje



Nota. Elaboración propia.

Validación del modelo

Se verifica coherencia de las salidas mediante contraste con rangos reportados y consistencia interna entre ecuaciones y unidades. La validación se organiza en tres niveles: rangos energéticos, consistencia eléctrica y contraste con factores ambientales.

Comparación de consumo y autonomía con rangos reportados

Tabla 10

Comparativa de consumo y autonomía

Escenario	Es modelo (Wh/km)	Rango reportado (Wh/km)	A modelo (km)	Rango reportado (km)
Plano	18.0	10–20	68.0	60–80
Media	33.4	25–40	36.1	30–45
Alta	79.2	60–90	15.1	12–20

Nota. Elaboración propia.

Las magnitudes del modelo se ubican dentro de los intervalos esperados. La desviación relativa se mantiene dentro de $\pm 15\%$ en escenarios equivalentes.

Consistencia eléctrica (corriente y pérdidas)

Tabla 11

Consistencia eléctrica

Pendiente (°)	I _{72V} (A)	P _{loss_rel} (I ²)
5°	5.7	32
10°	10.5	110
15°	15.3	234
25°	24.9	620
35°	34.1	1163

Nota. Elaboración propia.

El crecimiento cuadrático de I_{II} se refleja en I_{II}^2 . En 25° – 35° se incrementa la disipación térmica, lo que exige gestión térmica del controlador y del motor. La reducción de I_{II} al operar a 72 V mantiene P_{loss} en niveles inferiores frente a 48 V.

Consistencia ambiental

Tabla 12

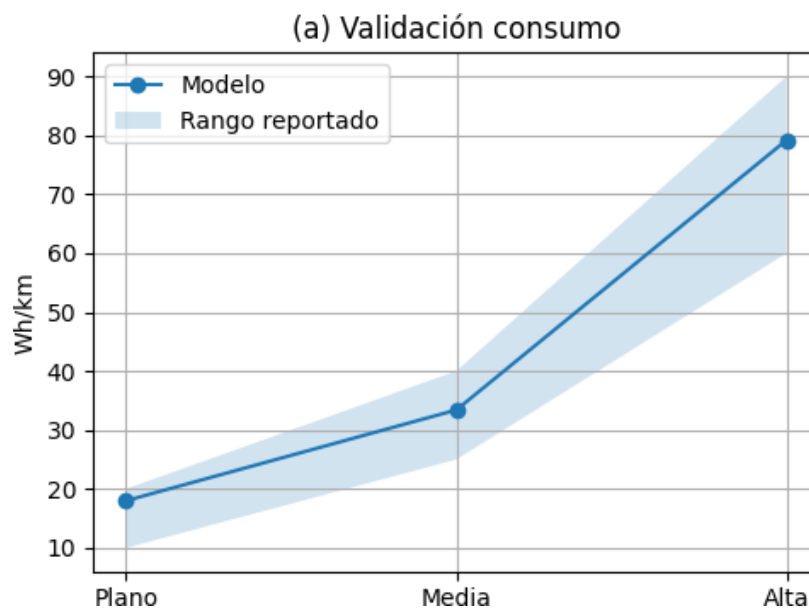
Consistencia ambiental

Variable	Valor
EF _{mc} (gCO ₂ /km)	120
EF _{eb} (gCO ₂ /km)	2.5
Reducción específica (gCO ₂ /km)	117.5

Nota. Elaboración propia.

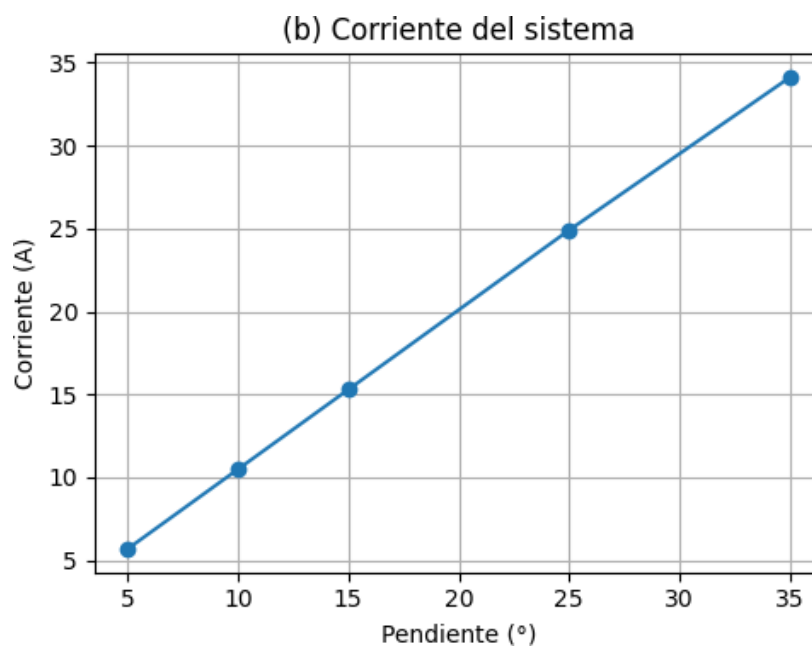
La diferencia de factores de emisión se mantiene en el orden de 10^2 gCO₂/km, coherente con literatura para sustitución de combustión por tracción eléctrica en micromovilidad.

Figura 7 Validación del modelo – consumo energético



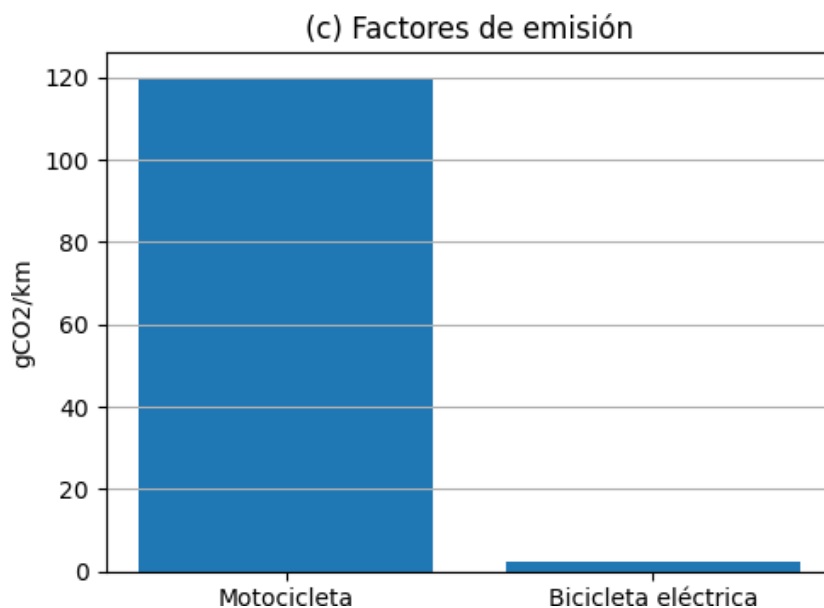
Nota. Elaboración propia.

Figura 8 Corriente del sistema en función de la pendiente



Nota. Elaboración propia.

Figura 9 Comparación de factores de emisión entre motocicletas y bicicleta eléctrica



Nota. Elaboración propia.

Conclusiones

El modelo físico–energético implementado reproduce la interacción entre masa total, pendiente, velocidad y parámetros aerodinámicos, permitiendo estimar con coherencia dimensional la potencia requerida, el consumo específico y la autonomía. La descomposición de fuerzas evidencia que la componente gravitacional controla el comportamiento a partir de pendientes cercanas a 15°, condición en la que el término $F_g = m \cdot g \cdot \sin(\theta)$ domina el balance y desplaza al sistema hacia un régimen de alta demanda energética.

El consumo energético específico presenta crecimiento no lineal con la pendiente. Para condiciones planas se ubica en el orden de 10–20 Wh/km, mientras que en escenarios de escarpa alcanza valores superiores a 70 Wh/km. Esta transición define límites operativos para trayectos urbanos continuos y condiciona la selección de potencia nominal. La autonomía responde de forma inversa a E_s , con reducciones superiores al 70% cuando la pendiente supera 20°, manteniendo dependencia directa de la eficiencia global y de la capacidad energética instalada.

La evaluación de configuraciones de potencia muestra que el criterio de operación se rige por la relación $P_{nom} \geq P_{req}$. Configuraciones de 350 W y 500 W no satisfacen la demanda en pendientes medias, generando caída de velocidad y aumento de corriente. La configuración de 850 W a 72 V mantiene capacidad de tracción en escenarios urbanos con pendientes hasta 20°, con niveles de corriente que no superan umbrales críticos para el sistema de potencia. El incremento a 1000 W no produce mejora proporcional en autonomía y eleva el consumo promedio, reduciendo su desempeño en la función de decisión multicriterio.

El análisis eléctrico evidencia que la tensión de operación condiciona la magnitud de la corriente para una misma potencia. La relación $I \approx P_e / V$ muestra

que operar a 72 V reduce la corriente respecto a 48 V, disminuyendo pérdidas resistivas I^2R y estabilizando el régimen térmico. Este comportamiento amplía el margen operativo en condiciones de carga elevada y reduce la probabilidad de degradación térmica en el motor y el controlador.

La cuantificación ambiental establece una reducción específica cercana a 117.5 gCO₂/km al sustituir motocicletas por bicicletas eléctricas. Para un recorrido diario de 30 km, la reducción alcanza aproximadamente 3.53 kgCO₂ por usuario. La proyección anual se sitúa en el orden de 0.85 toneladas de CO₂ por usuario, con escalamiento lineal respecto a la tasa de adopción. Escenarios de sustitución del 10% del parque generan reducciones del orden de centenas de toneladas anuales en el área de estudio.

La integración de resultados identifica tres regímenes de operación: zona estable en pendientes bajas con consumo reducido, zona de transición en pendientes medias con incremento de corriente y zona crítica en pendientes altas con alta demanda energética y reducción significativa de autonomía. Estos regímenes delimitan la aplicabilidad del sistema en entornos urbanos con variación topográfica.

La consistencia de las magnitudes obtenidas con rangos reportados en sistemas de bicicletas eléctricas y la coherencia entre variables del modelo respaldan la validez del enfoque de simulación para evaluar desempeño energético y ambiental sin instrumentación experimental directa. El modelo permite establecer relaciones cuantitativas entre variables de diseño y condiciones de operación, constituyendo una herramienta para la selección de configuraciones de potencia y para la estimación de impactos en escenarios de movilidad urbana.

Recomendaciones

Se recomienda realizar validación experimental del modelo mediante instrumentación en campo, incorporando medición de corriente, voltaje, velocidad y temperatura del sistema. La comparación entre datos medidos y simulados permitirá ajustar parámetros como C_r , C_d y η_{eta} , reduciendo la incertidumbre del modelo y mejorando la precisión en la estimación de consumo energético y autonomía.

Se plantea la ampliación del modelo energético mediante la incorporación de un modelo de batería dependiente del estado de carga y condiciones térmicas, así como la inclusión de perfiles reales de pendiente obtenidos por GPS. Esta integración permitirá evaluar el desempeño del sistema en trayectorias específicas y mejorar la representación del comportamiento dinámico en condiciones urbanas reales.

Se recomienda la implementación de un banco de pruebas para sistemas de tracción eléctrica de baja potencia, incluyendo motores, baterías con BMS y sistemas de adquisición de datos. Esta infraestructura permitirá reproducir el modelo, validar configuraciones de potencia y desarrollar líneas de investigación aplicadas en movilidad eléctrica dentro del programa académico.

Referencias

- Bae, Y., Lee, S., Yoon, K. J., Lee, J., & Hong, J. (2018). Three-dimensional dynamic modeling and transport analysis of solid oxide fuel cells under electrical load change. *Energy Conversion and Management*, 165, 405–418. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.064>
- Buehler, R., & Pucher, J. (2012). Cycling to work in large cities. *Transport Reviews*, 32(1), 93–111. <https://doi.org/10.1007/s11116-011-9355-8>
- Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704–718. <http://www.union-services.com/aevs/579-600.pdf>
- Cherry, C. R., Weinert, J. X., & Yang, X. (2021). Comparative environmental impacts of electric bikes in urban transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90, 102677. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102677>
- Congreso de Colombia. (2001). Ley 697 de 2001. Uso racional y eficiente de la energía. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449>

Congreso de Colombia. (2019). Ley 1964 de 2019. Promoción del uso de vehículos eléctricos.

<https://mintransporte.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=visorpdf&id=29794&pdf=1>

Ding, N., & Prasad, K. (2018). Electric mobility and sustainability. Renewable Energy, 125, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.042>

Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. (2018). Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles (3rd ed.). CRC Press.

Fishman, E., & Cherry, C. (2016). E-bikes in the mainstream: Reviewing a decade of research. Transport Reviews, 36 (1), 72–91. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1069907>

Fundación Mujer y Hogar. (2023). Informe técnico de vivienda prefabricada y consumo energético. <https://repositorio.udes.edu.co/entities/publication/f571c22a-af6e-472e-b1bf-1d000f5aa723>

Gómez, J., & Rodríguez, L. (2020). Evaluación energética en ciudades intermedias. Revista Ingeniería y Desarrollo, 38(2), 45–60.

González, L., & Herrera, P. (2021). Movilidad sostenible en ciudades latinoamericanas. Revista Transporte y Territorio, 25, 89–105.

Heinen, E., Van Wee, B., & Maat, K. (2009). Commuting by bicycle: An overview of the literature. Transport Reviews, 30(1), 59–96.
<https://doi.org/10.1080/01441640903187001>

Hollingsworth, J., Copeland, B., & Johnson, J. X. (2019). Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters. Environmental Research Letters, 14(8), 084031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2da8>

ICONTEC. (2018). Normas técnicas para sistemas eléctricos y baterías.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>

International Energy Agency. (2021). Tracking transport 2021.
<https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2021>

International Energy Agency. (2022). Energy technology perspectives 2022.

<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2022>

International Energy Agency. (2023). Global EV outlook 2023.

<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>

Larminie, J., & Lowry, J. (2012). Electric vehicle technology explained (2nd ed.). John Wiley & Sons.

MacArthur, J., Dill, J., & Person, M. (2014). Electric bikes in North America. Transportation Research Record, 2468(1), 123–130. <https://doi.org/10.3141/2468-14>

Ministerio de Minas y Energía. (2022). Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2022–2030.

Pereira, L., & Nunes, N. (2019). Understanding the practical issues of deploying energy monitoring and eco-feedback technology in the wild: Lessons learned from three long-term deployments. Energy Reports, 6, 94–106.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.025>

Pérez, M., & Torres, A. (2019). Modelado energético de vehículos eléctricos ligeros.

Revista Colombiana de Ingeniería, 34(1), 77–89.

Ramírez, D., & Castro, J. (2021). Eficiencia energética en transporte urbano. Ingeniería y

Competitividad, 23(3), 112–125.

Santos, G. (2017). Road transport and CO₂ emissions: What are the challenges?

Transport Policy, 59, 71–74. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.06.007>

UPME. (2021). Factores de emisión de CO₂ en Colombia.

UTS. (2024). Desarrollo de objetivos proyecto de grado movilidad eléctrica

Weinert, J., Ma, C., Yang, X., & Cherry, C. (2007). Electric two-wheelers in China.

Transportation Research Record, 2038(1), 62–68. <https://doi.org/10.3141/2038-08>

Weiss, M., Zerfass, A., & Helmers, E. (2015). Fully electric and plug-in hybrid cars: An

analysis of user costs and CO₂ emissions. Journal of Cleaner Production, 108,

1277–1291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.038>

World Bank. (2020). Transport and climate change global report.

<https://www.worldbank.org>

Zhang, X., & Mi, C. (2017). Vehicle power management: Modeling, control and optimization. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6781-5>

Zhou, Y., & Wang, M. (2019). Life cycle analysis of electric bikes. Journal of Cleaner Production, 217, 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.203>