



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Determinación del factor de autonomía de una bicicleta con sistema
de propulsión asistida en la ciudad de Cuenca.

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO AUTOMOTRIZ

Autor

Narváez Condo Jaime Sebastián

Director

Ing. Mateo Chalco, MSc.

CUENCA – ECUADOR

2024

Dedicatoria

A mi padre, quien, con sacrificio y esfuerzo incansable, ha sido mi guía para alcanzar esta meta académica. A mi madre, cuyo apoyo fue mi refugio en los momentos más difíciles.

A mis hermanas, compañeras de risas y apoyo constante en este viaje.

A mis abuelos, su presencia constante y sabiduría han sido mi mayor fortaleza. Las lecciones sobre fuerza y dedicación que compartieron han dejado una marca imborrable en mi corazón.

Agradecimiento

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Ing. Mateo Chalco, MSc, por su orientación y apoyo constante como director de esta tesis. Sus valiosos consejos fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo académico.

Así mismo, agradezco al Ing. Gustavo Álvarez, MSc, por su valiosa contribución y sus visiones críticas que enriquecieron esta investigación.

A todos los que contribuyeron a hacer realidad este proyecto académico, ¡mi más profundo agradecimiento!

Determinación del factor de autonomía de una bicicleta con sistema de propulsión asistida en la ciudad de Cuenca.

Resumen

El uso de sistemas de movilidad sostenible es un tema de interés global para reducir la contaminación ambiental y la congestión vehicular en áreas urbanas. En este contexto, se investigó el factor de autonomía de bicicletas eléctricas asistidas en Ecuador, en la ciudad de Cuenca, que está a 2550 msnm. Se realizaron pruebas que integraron ciclovías y sistema de bicicleta pública de la ciudad mediante mediciones de consumo energético de las bicicletas eléctricas y se obtuvo un factor de autonomía promedio de 0.0044 ± 0.0017 kWh/km. Estos resultados difieren significativamente de los valores asumidos en investigaciones previas basadas en datos de otras ciudades, lo que destaca la importancia de considerar factores como la topografía. Además, se realizó una comparación de la bicicleta electro asistida con el transporte público y privado, destacando su eficiencia energética y sostenibilidad. La introducción de bicicletas eléctricas compartidas puede contribuir a una movilidad sostenible en nuestra ciudad.

Palabras clave---Factor de autonomía, Bicicleta electro asistida, Bicicleta compartida, Ciclovías, Movilidad eficiente.

Determination of the autonomy factor of a bicycle with assisted propulsion system in the city of Cuenca.

Abstract

The use of sustainable mobility systems is a topic of global interest to reduce environmental pollution and vehicular congestion in urban areas. In this context, the autonomy factor of electric assisted bicycles was investigated in Ecuador, in the city of Cuenca, which is at 2550 meters above sea level. Tests integrating bicycle lanes and the city's public bicycle system were conducted by measuring the energy consumption of electric bicycles and an average autonomy factor of 0.0044 ± 0.0017 kWh/km was obtained. These results differ significantly from values assumed in previous research based on data from other cities, highlighting the importance of considering factors such as topography. In addition, a comparison of electric-assisted cycling with public and private transport was performed, highlighting its energy efficiency and sustainability. The introduction of shared electric bicycles can contribute to sustainable mobility in our city.

Keywords--- Autonomy factor, Electro-assisted bicycle, Bicycle sharing, Bike lanes, Efficient mobility.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	1
MATERIALES Y MÉTODOS	4
MATERIALES.....	5
<i>Rutas.....</i>	5
<i>Bicicleta.....</i>	5
<i>Vatímetro</i>	6
<i>Ciclistas.....</i>	6
<i>Tráfico</i>	7
<i>GPS.....</i>	7
METODOLOGÍA.....	7
RESULTADOS	8
<i>Velocidades en las rutas</i>	8
<i>Topografías.....</i>	8
<i>Características de las rutas</i>	9
<i>Datos obtenidos.....</i>	9
<i>Factor de autonomía en cada ruta.....</i>	10
<i>Factor de autonomía</i>	11
<i>Comparación.....</i>	11
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	13
CONCLUSIONES	13
RECOMENDACIONES	14
REFERENCIAS	16
ANEXOS.....	18

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Velocidad promedio por ruta.....	8
Tabla 2. Características de las rutas	9
Tabla 3. Energía obtenida con vatímetro	10
Tabla 4. Factor de autonomía/ruta	10
Tabla 6. Factor de autonomía	11
Tabla 7. Repeticiones vehículo/bicicleta	12
Tabla 8. Comparativa de Consumo Energético - Ruta 1	12
Tabla 9 Dimensionamiento de batería	13

ÍNDICE DE TABLAS

Figura 1. Mapa de las rutas.....	5
Figura 2. Bicicleta electro asistida.....	6
Figura 3. Vatímetro	6
Figura 4. Horario de tráfico en Cuenca	7
Figura 5. Velocidades promedio en las rutas	8
Figura 6. Topografía de las 3 rutas	9
Figura 7. Boxplot Factor de autonomía en las rutas	11

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	18
Anexo 2	18

Determinación del factor de autonomía de una bicicleta con sistema de propulsión asistida en la ciudad de Cuenca.

Jaime Sebastián Narváez Condo, André Mateo Chalco Orellana

Escuela de ingeniería automotriz

Universidad del Azuay

Sebastián@es.uazuay.edu.ec

Introducción

Alrededor del mundo, el uso de nuevas alternativas de transporte ha sido un tema que cada día adquiere importancia, con medios de transporte alternativos como: buses, autos, bicicletas, scooter, motos eléctricas, etc. Con estas alternativas se busca reducir el nivel de emisiones contaminantes en ciudades grandes y pequeñas, en términos de superficie y densidad poblacional. Para precautelar la seguridad de las personas que se movilizan en un medio de transporte alternativo, se han implementado carriles exclusivos, que en un inicio se usaban para uso único de bicicletas, pero con el incremento de más medios de transporte, han pasado a ser ciclovías compartidas y, con esto hoy en día es evidente la importancia de una alternativa de transporte sostenible.

A nivel global, se han desarrollado políticas públicas que respaldan la adopción de sistemas de movilidad sostenible. Un ejemplo de ello se encuentra en la Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible (PNMUS), la cual establece que las ciudades ecuatorianas contarán con el respaldo de esta política para la implementación de programas, planes y proyectos destinados a mejorar la eficiencia en el desplazamiento de las personas. Esto se traduce en reducciones tanto en el tiempo de viaje como en el consumo de energía, lo que conlleva un ahorro considerable tanto para los ciudadanos como para el estado (De Coninck et al., 2023).

Con base en estas políticas se han implementado distintos modos de movilidad sostenible, entre los cuales, el más común y efectivo son las ciclovías las cuales ayudan a reducir los alarmantes índices de congestión vehicular y contaminación ambiental (Aposto Lou, 2020).

Europa es una región que ha empezado el desarrollo sostenible varios años atrás, por lo que ciudades como; Ámsterdam, en Países Bajos, tiene 858 km de ciclovías; otra ciudad que resalta es Oslo en Noruega, que cuenta con 327 km de carriles para bicicletas y finalmente Helsinki, en Finlandia, tiene 1301 km de ciclovías; dando así una idea del avance que tiene Europa con nuestra región (Duarte, 2021).

Por otro lado, en Latinoamérica hay 2.513 km de ciclovías, siendo Bogotá y Río de Janeiro las ciudades con mayor cantidad de kilómetros segregados de infraestructura ciclista (Ríos et al., 2015).

Para tener una visión más real de lo que ocurre en Ecuador, es importante conocer los kilómetros de ciclovías que tienen ciudades parecidas en extensión al país antes

mencionado, entre esas nos encontramos con: Cochabamba, Bolivia, tiene 23,6 km de ciclovías; Mendoza, Argentina, que tiene 11,8 km de ciclovías (Lleras et al., 2019) por parte en Ecuador, la ciudad de Cuenca tiene 38,04 km de ciclovías que actúan en conjunto con una red de bicicletas públicas compartidas (Mancheno & Ormaza, 2015).

A pesar de contar con modos de transporte seguros y eficientes, a menudo no se logra generar un interés genuino en cambiar la forma de viajar. Esto se debe a la falta de una conexión efectiva entre los diferentes medios de transporte, un concepto conocido como 'intermodalidad'.

La intermodalidad es la combinación de la bicicleta con otros medios de transporte, como autobuses, tranvías, etc., de una manera muy práctica y así ampliar los trayectos de los usuarios cotidianos (CONBICI, 2018).

Es así que podemos decir que la intermodalidad es un aporte considerable, pero un factor determinante en la movilidad que ayuda a facilitar aún más el esfuerzo que realice un usuario de bicicleta. En Bogotá – Colombia, se ejecutó un estudio que muestra que en recorridos cortos con una pendiente mayor al 5%, los usuarios de bicicletas convencionales (sin asistencia al pedaleo) tuvieron un 8% más de tiempo de movilización, por lo que además ese porcentaje representa una mayor dificultad al cubrir una ruta de 10 km, en comparación a los usuarios de bicicleta eléctrica, que cubrieron la misma distancia (José et al., 2017).

En los últimos años, ha surgido un notable aumento en la adopción de sistemas de movilidad compartida en América Latina. La mayoría de las principales ciudades de la región han presenciado un crecimiento significativo en sus sistemas de bicicletas públicas, con un crecimiento exponencial. Dentro de esta tendencia, destaca el sistema Eco bici en la Ciudad de México, que ostenta la mayor flota de bicicletas en la región, compuesta por 6800 unidades, incluyendo bicicletas eléctricas. Además, este sistema ha registrado una impresionante cifra de más de 60 millones de viajes anuales (Pardo et al., 2020).

Con este contexto, los estudios relacionados con la correcta implementación de sistemas de propulsión en sistemas de bicicletas públicas, toma mayor importancia. Por esto es de gran interés la determinación del impacto energético que tendría un sistema de bicicleta eléctrica pública en la ciudad de Cuenca.

Para evaluar adecuadamente el impacto energético, es esencial determinar dos factores esenciales: la distancia que cada bicicleta recorre bajo condiciones de operación ideales y el factor de autonomía energética. Este último se expresa en términos de kWh por kilómetro, y representa la cantidad de energía consumida por cada kilómetro recorrido (Chalco, 2021).

El factor de autonomía energética es un valor que varía con respecto a las características de una ciudad, en Barcelona, España, una ciudad que se encuentra a tan solo 12 msnm, se realizó un estudio y se obtuvo un valor de 0.0059 kWh/km (Veliz, 2018) por otro lado, en Bucaramanga Colombia, que está a 959 msnm, se utilizó el valor de 0.0072 kWh/km (Rodríguez, 2019).

Al explorar los factores que ejercen influencia en el rendimiento energético de las bicicletas eléctricas asistidas, los investigadores concuerdan en que uno de los factores cruciales es la topografía del terreno. En Europa, se busca aliviar la congestión vial mediante el uso de bicicletas eléctricas para realizar entregas, además de fomentar la transformación de las vías urbanas en entornos públicos más silenciosos y atractivos para todos los usuarios. No obstante, la topografía puede tener un impacto significativo en la adopción de bicicletas de carga comerciales, ya que puede afectar la autonomía de las baterías utilizadas por los ciclistas (Giordano et al., 2022).

En la ciudad se realizó un estudio sobre la estimación de la demanda energética para un sistema de bicicleta pública (Chalco, 2021), pero en este estudio no se tuvo en cuenta un factor de autonomía propio, por lo que es necesario determinar un factor de autonomía energética propio para la ciudad de Cuenca que se encuentra a 2550 msnm (Jerves Cobo & Armijo Arcos, 2016).

Con este contexto uno de los estudios más representativos fue el realizado por un grupo de investigadores en la universidad de Tennessee en Estados Unidos, este valor fue el adaptado por Rodríguez (Rodríguez, 2019) en Bucaramanga, en este estudio se realizó una simulación en la que se tenía en cuenta factores como, la topografía, distancia recorrida y las rutas más usadas del lugar en donde se realizó.

Por lo tanto, es importante destacar que la velocidad de consumo de energía se calcula considerando la distancia del viaje multiplicada por la velocidad de descarga de la batería, o lo que se conoce como la curva característica de la batería. En este cálculo, se asume que la velocidad de descarga de la batería sigue una distribución uniforme en el rango de 10 a 22 vatios-hora. Esta suposición se fundamenta en mediciones empíricas realizadas por los investigadores y en investigaciones previas. En otras palabras, se está evaluando cómo la velocidad de descarga de la batería varía en función de la distancia recorrida y cómo esta variación afecta el consumo de energía durante el viaje (Ji et al., 2014).

Además, el estudio en cuestión proporciona un valor que se utilizó como suposición para realizar estimaciones de la demanda energética en ciudades de América Latina. Sin embargo, es importante destacar que este valor se basa en condiciones específicas de la ciudad de Tennessee, en Estados Unidos. En última instancia, los autores sugieren llevar a cabo pruebas reales que tengan en cuenta las condiciones críticas mencionadas para obtener resultados más precisos.

Como se ha mencionado previamente, los estudios relacionados con el Factor de Autonomía Energética en bicicletas eléctricas asistidas a menudo se basan en simulaciones y cálculos matemáticos, pero con frecuencia pasan por alto la importancia de las pruebas de conducción reales. Varios autores coinciden en la necesidad de llevar a cabo este tipo de pruebas para obtener valores más precisos y representativos de las condiciones de una ciudad específica. Es importante destacar que las bicicletas eléctricas son un modo de transporte personal altamente eficiente en términos de energía, logrando aproximadamente 80.47 kilómetros por kWh, y no generan emisiones de escape (Weinert et al., 2007).

También se habla sobre otros tipos de bicicletas públicas, como lo dejan saber un grupo de investigadores asiáticos que mencionan que: actualmente, el uso compartido de bicicletas se clasifica principalmente en dos modalidades, el sistema con estaciones y el sistema sin estaciones. El modelo de uso compartido con estaciones, en su mayoría financiado por el gobierno, implica la instalación y operación de una amplia red de estaciones fijas donde los usuarios alquilan y devuelven las bicicletas. Por otro lado, el modelo sin estaciones elimina las restricciones de ubicación para recoger y devolver bicicletas al permitir a las personas utilizar dispositivos móviles inteligentes para alquilar y devolver bicicletas en cualquier lugar de manera más flexible (Hu et al., 2022).

Luego de todas las consideraciones, se sabe que estas políticas funcionan, y traen beneficios, en términos de congestión vehicular, y GEI, por esta razón, en Ibagué, Colombia, una ciudad que tiene una densidad poblacional de 361 hab/Km², similar a Cuenca, Ecuador, que es 416 hab/Km², se ha dado inicio al proyecto piloto destinado a la introducción de un sistema de bicicletas de pedaleo asistido de uso compartido. Se ha finalizado la evaluación que establece los aspectos legales, financieros y técnicos fundamentales de esta iniciativa piloto. Basándose en estos resultados, se ha puesto en marcha el proceso de licitación para adquirir las bicicletas y desarrollar las instalaciones de estacionamiento necesarias (euro clima+, 2020).

En la ciudad de Cuenca, se cuenta con un sistema de bicicleta pública que podría adoptar esas transformaciones. El proyecto se conoce como Bici Pública Cuenca y se compone de estaciones inteligentes, distribuidas en diferentes puntos de la ciudad. El usuario puede retirar la bicicleta en la estación a través de una aplicación descargada en su smartphone, devolviéndola en cualquier estación después del uso. Este sistema pretende ofrecer a la ciudad de Cuenca una opción de transporte sostenible, saludable y no contaminante (BICICUENCA S.A, 2019). El cambio de tecnología es de gran ayuda para la disminución de problemas de congestión vehicular y obtener un factor de autonomía en las ciclovías es un punto inicial ideal en términos de eficiencia del sistema.

A través de la implementación de estas políticas, se persigue el objetivo de fomentar el incremento en la utilización de modalidades de movilidad alternativas, con el propósito de contribuir de manera significativa a la disminución de la contaminación ambiental, en especial en el entorno urbano.

Este trabajo persigue el objetivo de seleccionar rutas entre estaciones de la ciudad de Cuenca en ciclovías que reflejen la topología de la ciudad. Se plantea un análisis detallado de las rutas más críticas en términos de demanda energética. Este estudio tiene como fin determinar cuál es el factor de autonomía en dichas rutas. Los resultados obtenidos contribuirán de manera significativa a la comprensión de cómo optimizar la eficiencia y el rendimiento de las bicicletas asistidas en Cuenca, promoviendo así una movilidad más sostenible.

Materiales y Métodos

En la ciudad de Cuenca, se han desarrollado más de 25 kilómetros de infraestructura para ciclistas, principalmente diseñada para su uso en conjunto con el sistema de bicicletas públicas, conocido como (BICICUENCA S.A, 2019). Según información proporcionada por la Empresa Municipal de Movilidad (EMOV), se

encuentran operativas un total de 20 estaciones que ofrecen bicicletas públicas para la comunidad. Dentro de este conjunto de estaciones, se ha llevado a cabo un análisis para identificar aquellas que presentan una mayor demanda energética.

Materiales

Rutas

Las estaciones que han mostrado una demanda energética significativa son las siguientes: Estación número 1, Terminal Terrestre (Sarmiento, 2021), Estación número 7, Parque Calderón (Paredes, 2021), Estación número 19, La Salle (Luzuriaga, 2021), Estación número 19, La Salle y Estación número 20, Universidad del Azuay (Chalco, 2021). Estas estaciones se ubican estratégicamente en puntos clave de la ciudad, como se observa en la figura 1.

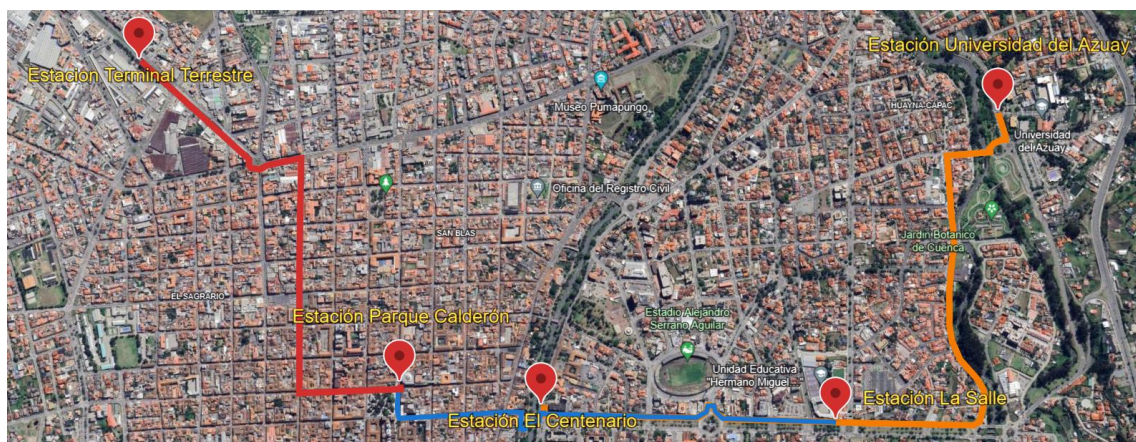


Figura 1. Mapa de las rutas

Fuente: Autor

Cabe destacar que estas estaciones ofrecen una buena accesibilidad entre sí. Con esta información, se ha decidido llevar a cabo la planificación de rutas específicas para determinar el factor de autonomía de la bicicleta eléctrica entre las cuatro estaciones mencionadas anteriormente.

En cuanto a las características de las rutas, su distancia es de 13.2 kilómetros. Para obtener resultados representativos, se llevará a cabo la repetición de estas tres rutas en diez ocasiones, lo que resultará en un total de treinta repeticiones y un recorrido acumulado de 132 kilómetros.

Bicicleta

La bicicleta (Figura.2) utilizada cuenta con un peso de 25 Kg, además de que la batería debe tener ciertas prestaciones energéticas es por lo que en la actualidad los dispositivos electrónicos modernos han encontrado una solución efectiva a sus necesidades energéticas en las baterías de ion-litio, gracias a su elevada densidad de energía, capacidad de descarga y ciclo de vida, que han satisfecho sus requisitos energéticos de manera eficaz (Rodríguez et al., 2019).

Por lo cual la batería que lleva equipada es de ion-litio y tiene 48 V y 18 Ah, que alimenta a un motor de 500 w, estas son las especificaciones más importantes para tener

cuenta porque de esto dependerá en gran mayoría el factor de autonomía de la bicicleta electro asistida.



Figura 2. Bicicleta electro asistida

Fuente: Autor

Vatímetro

Por su parte el vatímetro (Figura.3) es un instrumento que mide la potencia eléctrica, expresada en vatios (W). Esta medición es esencial para evaluar y controlar el consumo de energía eléctrica en dispositivos, hogares e industrias. Además, se utiliza para calcular el consumo total de energía a lo largo del tiempo, expresado en kilovatios-hora (kWh), lo que representa el consumo de un dispositivo a una potencia de un kilovatio durante una hora (Baylón Jaquez et al., 2010).

En este estudio se utilizará un vatímetro de Intertek, que tiene un voltaje de operación de 120 V a una frecuencia de 60Hz, que permite visualizar en su pantalla LCD los valores requeridos, en este caso kWh, que ayuda a visualizar el consumo de energía con cada recarga de batería de cada ciclista.



Figura 3. Vatímetro

Fuente: Autor

Ciclistas

Con el objetivo de obtener resultados más representativos de los diferentes estilos de conducción de la población, se dividió el proceso para seis personas que están en un rango de edad entre 18-50 años, quienes realizaron la conducción de la bicicleta electro asistida en las rutas previamente establecidas. Esta diversificación de conductores permitió abordar variaciones en el comportamiento de conducción, lo que contribuyó a una evaluación más completa y precisa de la autonomía de la bicicleta eléctrica (Ver Anexo 2).

Tráfico

Además de asegurar la variabilidad en los resultados y que sean más representativos, se consideró realizar las pruebas en los horarios (Figura.4) que contempla el plan de movilidad y espacios públicos de Cuenca.

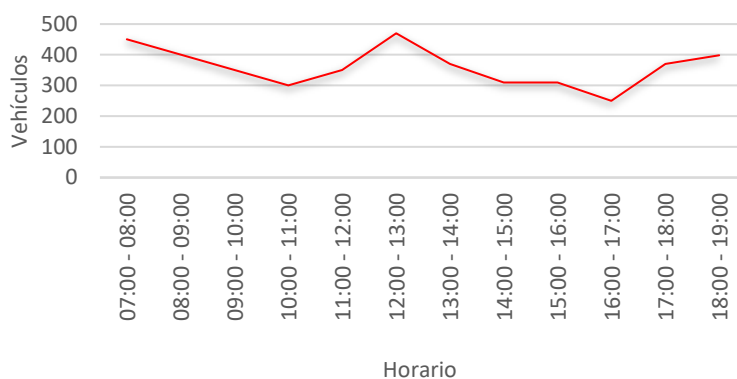


Figura 4. Horario de tráfico en Cuenca

Fuente: Adaptado de (Mancheno & Ormaza, 2015)

En cualquier tipo de vía, la intensidad de tráfico experimenta variaciones a lo largo del tiempo, observándose oscilaciones cíclicas según la escala de tiempo considerada (anual, semanal, diario, horario) (Mancheno & Ormaza, 2015).

GPS

Adicionalmente, se utilizó un sistema de posicionamiento global (GPS) que pertenece a la empresa Luozirui, y está en su versión 4.040, esta aplicación en conjunto con un dispositivo móvil tiene una frecuencia de datos de 10 Hz, lo que ayuda a tener una mejor precisión en la recolección de datos y tener una mejor caracterización en la topografía de las rutas. Estos gráficos proporcionaron información detallada sobre la conducción, lo que enriqueció el análisis de consumo energético y permitió comprender mejor el desempeño de la bicicleta en diferentes situaciones de terreno y tráfico (Ver Anexo 1).

Metodología

El método empleado para calcular el factor de autonomía se asemejó a un análisis de consumo de energía similar a lo que se realiza en la evaluación del consumo de combustible en vehículos automotores. Sin embargo, en este caso, se implementó el uso de un vatímetro intertek para medir la cantidad de energía eléctrica consumida por la bicicleta en términos de kilovatios-hora (kWh) durante cada ruta realizada.

Este enfoque metodológico facilitó la obtención de datos precisos sobre el factor de autonomía de las bicicletas eléctricas en el contexto específico de la ciudad de Cuenca, lo que resultará en valiosa información para la toma de decisiones en relación con el sistema de bicicletas públicas y su eficiencia energética.

Los datos obtenidos fueron organizados y procesados con el software Microsoft Excel, permitiendo la realización de cálculos de intervalos de confianza, valores promedios, generación de gráficos y facilitación de operaciones matemáticas. Esto resultó en un análisis efectivo de los datos y la obtención de resultados precisos y visuales.

Con este análisis se permitirá comprender mejor la eficiencia y la autonomía de las bicicletas eléctricas en el contexto de las ciclovías en la ciudad de Cuenca, lo que contribuirá a optimizar el funcionamiento del sistema de bicicletas públicas y a tomar decisiones informadas en cuanto a su gestión y expansión.

Resultados

La investigación ha dado como resultado datos fundamentales en área del consumo de energía, en particular del factor de autonomía (kWh/km). Estos resultados muestran cómo varía el mismo, teniendo en cuenta diversos modos de conducción, así como la topografía y las condiciones de tráfico en las rutas mencionadas anteriormente. Estos hallazgos no solo mejoran la comprensión en este campo, sino que también tienen un impacto significativo en la formulación de políticas de movilidad sostenible. A lo largo de esta sección, se destacarán los resultados clave y las tendencias que han surgido en este proceso de investigación.

Velocidades en las rutas

Una de las características relevantes en esta investigación se relaciona con el estilo de conducción de los ciclistas, el cual puede influir considerablemente en los niveles de consumo de energía. Esta variación en el estilo de conducción se refleja principalmente en la velocidad promedio (Figura.5) mantenida durante cada recorrido.

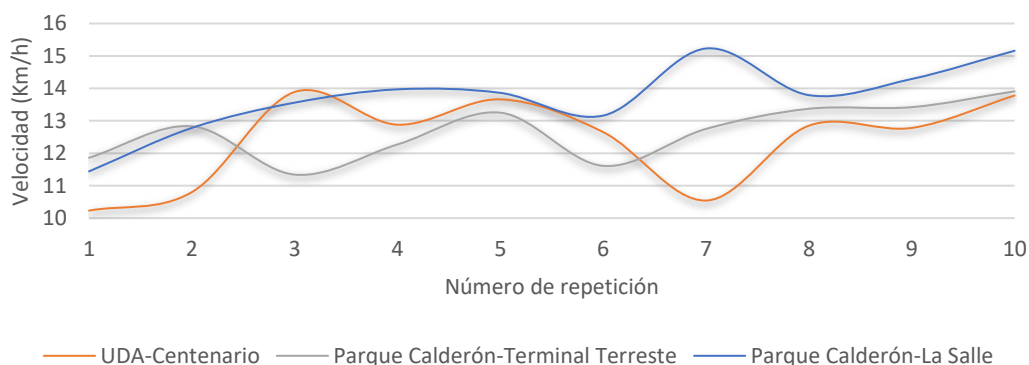


Figura 5. Velocidades promedio en las rutas

Fuente: Autor

Al analizar la variabilidad entre repeticiones en las rutas, se evidencia la relevancia de la diversidad en estilos de conducción y horarios. La información correspondiente se ha consolidado y se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Velocidad promedio por ruta

Velocidad promedio (Km/h)		
Universidad del Azuay-El Centenario	Parque Calderón-Terminal Terrestre	Parque Calderón-La Salle
12.41 ± 0.85	12.66 ± 0.53	13.72 ± 0.69

Fuente: Autor

Topografías

Además, resulta fundamental familiarizarse con otras de las características principales de las rutas que se analizarán, esto se puede observar en la figura 6.

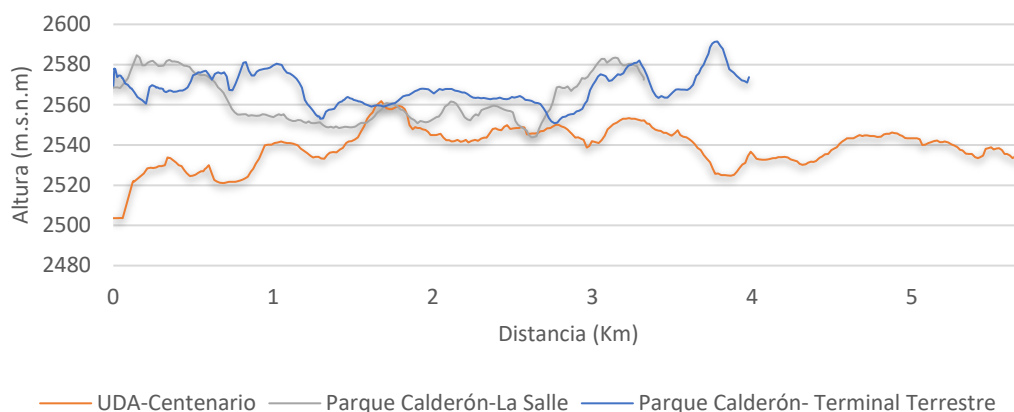


Figura 6. Topografía de las 3 rutas

Fuente: Autor

Tras un análisis y comprensión de las variaciones de altitud presentes en las rutas, resulta igualmente relevante entender características más detalladas de las mismas. Este paso será importante para los análisis posteriores.

Características de las rutas

Las distancias tienen un papel fundamental en el desarrollo de la investigación, gracias a bibliografía revisada se sabe que en el sistema de bicicleta pública de Barcelona en España se registró más de 15 millones de desplazamientos, en los que se indica que aproximadamente el 57% de estos viajes estaban relacionados con actividades laborales, con una distancia promedio de 3 km. Es relevante destacar que, durante los fines de semana, estos porcentajes aumentaron, llegando a una distancia promedio de 4,15 km (Sanmiguel-Rodríguez, 2019).

Estos resultados subrayan la necesidad de considerar tanto las características de las rutas (Tabla.2) como su longitud al evaluar la viabilidad de la movilidad sostenible en diversas áreas urbanas.

Tabla 2. Características de las rutas

Rutas	Distancia (Km)	Tiempo Promedio (min)	Pendiente (%)	Velocidad Promedio (Km/h)
UDA-Centenario	5.7	23.45	6.5	12.4
Parque Calderón-La Salle	3.5	15.96	15.6	12.5
Parque Calderón-Terminal Terrestre	4	16.13	6.7	13.7

Fuente: Autor

Datos obtenidos

Durante el proceso de ejecución de las 30 pruebas se implementó una estrategia de organización de los datos con el objetivo de optimizar su procesamiento. A partir de este punto, se hará referencia a las rutas "Universidad del Azuay-El Centenario", "Parque Calderón-La Salle" y "Parque Calderón-Terminal Terrestre" como "Ruta 1", "Ruta 2" y "Ruta 3", respectivamente. Esta adaptación en la nomenclatura se llevó a cabo con el propósito de simplificar la presentación de los resultados.

Después de completar las 10 pruebas en cada una de las rutas mencionadas, se recabaron valores de energía correspondientes a cada una de ellas. Estos datos representan una parte fundamental en el análisis y evaluación de los resultados obtenidos y se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Energía obtenida con vatímetro

Repetición	Ruta 1 (kWh)	Ruta 2 (kWh)	Ruta 3 (kWh)
1	0.031	0.019	0.008
2	0.036	0.016	0.010
3	0.034	0.021	0.012
4	0.029	0.019	0.008
5	0.039	0.021	0.012
6	0.027	0.015	0.010
7	0.028	0.016	0.011
8	0.030	0.015	0.010
9	0.027	0.019	0.011
10	0.026	0.021	0.012
Promedio	0.031	0.018	0.011

Fuente: Autor

Durante el análisis de los datos se ha observado la presencia de variabilidad en la cantidad de energía suministrada en cada una de las rutas. Esta discrepancia representa un aspecto significativo que merece especial atención, ya que se prevé que dichas variaciones se manifiesten de manera concreta al vincularlas con la distancia que tiene cada ruta.

Factor de autonomía en cada ruta

Una vez que se dispone de la cantidad de energía consumida en cada ruta y repetición, el siguiente paso consiste en calcular el Factor de Autonomía Energética (Tabla.4), el mismo está basado en la relación que existe entre la demanda energética obtenida con el vatímetro y la distancia de cada ruta (ecuación.1).

Además, previo a realizar los cálculos se debe tener en cuenta los valores promedio de demanda energética en cada ruta esto proporcionará una comprensión más precisa y detallada del consumo energético asociado a cada ruta permitiendo una evaluación completa.

$$\text{Factor de autonomía} = \frac{\text{Demanda Energetica (kWh)}}{\text{Distancia (Km)}}$$

Ecuación 1.

Tabla 4. Factor de autonomía/ruta

Factor de autonomía (kWh/Km)		
Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3
0.0054 ±0.00047	0.0052±0.00044	0.0027±0.00023

Fuente: Autor

En el proceso de análisis de los datos se observa una notable similitud (Tabla.4) entre los valores de energía suministrada en la ruta 1 y la ruta 2, a pesar de que presentan valores promedio de 0.031 kWh y 0.018 kWh, respectivamente. Sin embargo, esta discrepancia se aclara al examinar los perfiles topográficos de ambas rutas. Se evidencia que la ruta 2 presenta una pendiente que es un 9.1 % más pronunciada en comparación con la ruta 1. Esta diferencia topográfica con lleva un mayor consumo de energía, a pesar

de que la ruta 1 tiene 2.2 Km más que la ruta 2 su factor de autonomía difiere tan solo en 0.0002 kWh/Km. Por su parte, la ruta 3 difiere con las 2 rutas, esto como ya fue mencionado, se debe a las características de cada Ruta.

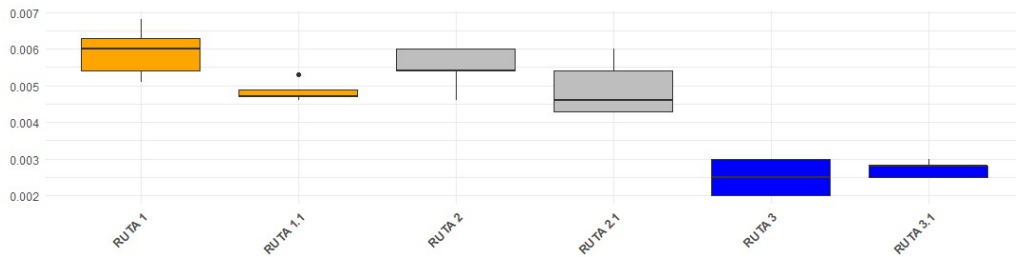


Figura 7. Boxplot Factor de autonomía en las rutas

Fuente: Autor

El gráfico de Boxplot representa el consumo de energía (en kilovatios-hora, kWh) en tres rutas de ciclovías diferentes, obtenidos a través de 6 personas que realizaron cada ruta 5 veces, lo que da un total de 30 observaciones. Cada Boxplot muestra la mediana del consumo de energía (línea en el centro de la caja), el rango intercuartílico (IQR) que indica la dispersión de los valores centrales (caja), y los valores extremos no atípicos (bigotes). Estos gráficos permiten comparar la variabilidad en el consumo de energía entre las rutas.

Factor de autonomía

Finalmente, al entender la variabilidad de datos y al conocer los factores de autonomía en cada ruta. Se puede obtener un factor de autonomía que represente y tenga características en las que pueda cumplir las rutas establecidas, el valor se presenta en la tabla 6.

Tabla 5. Factor de autonomía

Factor de autonomía Ruta 1-2-3 (kWh/Km)
0,0044±0.00017

Fuente: Autor

Comparación

Ciertamente, con fines explicativos, es posible convertir el factor de autonomía en unidades más comprensibles, expresándolo como "Kilómetros por Kilovatio-hora" (Km/kWh). Esta conversión hace que sea más fácil entender la eficiencia en términos de cuántos kilómetros puede recorrerse con un kilovatio-hora de energía, y, además, permite una comparación directa con la eficiencia de los vehículos eléctricos para un mejor entendimiento.

Uno de los vehículos más destacados en términos de rendimiento es el Nissan LEAF, que está equipado con una batería de 40 kWh con una autonomía de 280 km (Nissan Ecuador, 2023). Con estos valores se puede mencionar que el factor de autonomía expresando como "Kilómetros por Kilovatio-hora" del vehículo eléctrico es de 7 Km/kWh por otro lado, al considerar el factor de autonomía obtenido en esta investigación el valor expresando como "Kilómetros por Kilovatio-hora" es 227 Km/kWh.

El vehículo eléctrico tiene un aumento del 3142% en autonomía en comparación con la bicicleta electro asistida. Con una batería de 40 kWh, esta capacidad sería suficiente para alimentar completamente 58.5 bicicletas electro asistidas. Esto equivale a un recorrido total de 9080 km utilizando la misma cantidad de energía que la batería del vehículo, o bien, representa un total combinado de 531180 km si se usasen las 58.5 bicicletas electro asistidas.

Esto destaca la importancia de los sistemas de movilidad alternativos, en particular, las bicicletas electro asistidas.

Con el propósito de lograr una comprensión más precisa de las distinciones entre un vehículo eléctrico y un medio de transporte alternativo, como una bicicleta eléctrica asistida, se ha llevado a cabo una comparación en relación con la cantidad de viajes que ambos pueden realizar en las rutas 1, 2 y 3, y los resultados se observan en la tabla 6.

Tabla 6. Repeticiones vehículo/bicicleta

Rutas	Vehículo 0.684kWh	Bicicleta 0.684 kWh
1	0.57	9.10
2	0.88	14.80
3	0.78	12.95

Fuente: Autor

La comparación adquiere una mayor relevancia cuando se realiza considerando la capacidad máxima de la batería de la bicicleta eléctrica, ya que permite determinar cuántas veces tanto el vehículo como la bicicleta pueden llevar a cabo las rutas con la misma capacidad de batería.

Según datos proporcionados por Nissan, su vehículo eléctrico, el Nissan LEAF, posee una batería con una autonomía de 280 kilómetros (Nissan Ecuador, 2023). Por otro lado, de acuerdo con pruebas realizadas, la bicicleta eléctrica asistida tiene una capacidad de recorrido de 51.8 kilómetros (*Ver Anexo 1*). No obstante, al considerar un escenario hipotético en el que el vehículo cuenta con una batería de 0.684 kilovatios-hora (kWh) de capacidad, su rango de alcance se ve limitado a tan solo 3.1 kilómetros.

Además, se llevó a cabo un estudio en la ciudad de Cuenca que estimó el consumo energético específico en el transporte público y privado (Palacios & Sarmiento, 2018). Uno de los trayectos de ese estudio coincide en términos de distancia y destinos con la ruta denominada "ruta 1" en el presente trabajo. A continuación, se presentan los valores correspondientes para su análisis en la tabla 8.

Tabla 7. Comparativa de Consumo Energético - Ruta 1

Ruta 1	Energía consumida (kWh/Km)	Energía consumida (kWh/5.8Km)
Transporte Publico (Buses)	3.829	18.383
Transporte Privado	0.670	3.885
Bicicleta electro asistida	0.0054	0.0313

Fuente: Autor

La tabla resalta que el transporte público muestra el mayor consumo de energía por kilómetro, mientras que la bicicleta eléctrica asistida es la opción más eficiente. Este

dato es fundamental para evaluar las implicaciones medioambientales y de sostenibilidad de diversos modos de transporte en la "Ruta 1" de Cuenca.

Sin embargo, es vital considerar el número de pasajeros por viaje para lograr una evaluación completa de la eficiencia y sostenibilidad de los modos de transporte. A pesar del mayor consumo de energía por kilómetro en el transporte público, su eficiencia en términos de pasajeros transportados lo convierte en una alternativa más sostenible que el transporte privado. Esto destaca la importancia de fomentar la intermodalidad y la incorporación de bicicletas eléctricas asistidas de uso público.

Al reconsiderar la cantidad total de energía demandada por una batería en la ciudad de Cuenca, siguiendo la metodología empleada por (Chalco, 2021), se identifica un sobredimensionamiento en la elección realizada, principalmente atribuible al factor de autonomía asumido. Los valores resultantes de ambos análisis se detallan en la Tabla 9 a continuación.

Tabla 8 Dimensionamiento de batería

Selección de Batería		
Ecuación	Energía total demandada	
	Investigación Previa	Investigación Nueva
$E_T = E + [E * 25\%]$	0.225 kWh	0.138 kWh

Fuente: Adaptado de (Chalco, 2021)

Al analizar la disparidad entre los valores, se evidencia un error del 63%, indicando un sobredimensionamiento que podría resultar en gastos innecesarios en caso de considerar la implementación de bicicletas electro-asistidas en el sistema de bicicleta pública de la ciudad.

La introducción de bicicletas eléctricas asistidas compartidas puede desempeñar un papel clave en la reducción de la congestión vehicular y la contaminación en la ciudad. Al promover opciones de transporte más eficientes y sostenibles, se pueden lograr cambios significativos en términos de movilidad urbana y calidad del medio ambiente en Cuenca.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Con base en la revisión de la literatura, se determinó que las estaciones más críticas en términos de la distancia diaria recorrida son las siguientes: la estación número uno (Terminal Terrestre), la estación número siete (Parque Calderón), la estación número trece (El Centenario), la estación número diecinueve (La Salle) y la estación número veinte (Universidad del Azuay). En consecuencia, se establecieron las rutas específicas alrededor de estas cuatro estaciones críticas, las cuales son las siguientes: la Ruta 1, que va de la Universidad del Azuay a El Centenario; la Ruta 2, que conecta La Salle con Parque Calderón; y finalmente, la Ruta 3, que va desde Parque Calderón hasta el Terminal Terrestre. Para estas rutas, se llevó a cabo la determinación del factor de autonomía.

Con las rutas establecidas los resultados analizados del factor de autonomía que se mide en kWh/Km, están dentro de los valores obtenidos en pruebas experimentales y

simuladas de otras ciudades, es por esto, que el valor de 0,0072 kWh/Km que fue asumido en investigaciones realizadas en la ciudad tiene un error de un 38,8%, en comparación al obtenido en esta investigación que es 0,0044 kWh/Km, por lo que es evidente que al realizar un estudio en el que se considera factores propios de la ciudad de Cuenca como la topografía esta tiene una influencia real en los resultados.

Así también, al analizar las rutas que más demanda energética tienen en función de los viajes realizados se sabe que la Ruta 1 correspondiente a las estaciones de Universidad del Azuay y El Centenario con un porcentaje de pendiente de un 6.5% presentó un factor de autonomía de 0,0054 kWh/Km, la Ruta 2 que se limita por las estaciones Parque Calderón y La Salle con una pendiente de un 15.6% tienen un factor de autonomía de 0,0052 kWh/Km, finalmente la Ruta 3 que tiene como estaciones a la del Parque Calderón y Terminal Terrestre tuvo un factor de 0,0027 kWh/Km, con un porcentaje de pendiente de un 6.7%, siendo la topografía un factor esencial al observar las similitudes entre la Ruta 2 y la Ruta 1, además cabe recalcar que se obtuvieron valores variables gracias a la implementación de distintos ciclistas, que proporcionaron un rango de edad distinto además de tener diferentes tipos de conducción.

Estos resultados subrayan la importancia de tener en cuenta los factores geográficos locales al planificar la implementación de vehículos eléctricos en la ciudad de Cuenca. Además, evidencian la variabilidad en los índices de autonomía en diferentes rutas, la cual está influenciada por la diversidad de ciclistas y estilos de conducción. Por lo tanto, respaldan la necesidad de ajustar las políticas de movilidad y la planificación de la infraestructura de carga según las características geográficas específicas. Asimismo, subrayan la importancia de llevar a cabo investigaciones adicionales para profundizar en este tema y evaluar otros factores que puedan afectar la eficiencia de los vehículos eléctricos.

Por último, se procedió al cálculo de los intervalos de confianza para los conjuntos de datos correspondientes a cada una de las tres rutas bajo estudio. Los resultados revelaron intervalos de confianza sumamente reducidos:

- Para la Ruta 1, se obtuvo un intervalo de 0.0054 ± 0.00047 .
- En la Ruta 2, se registró un intervalo de 0.0052 ± 0.00044 .
- Por último, en la Ruta 3, el intervalo de confianza se situó en 0.0027 ± 0.00023 .

Estos hallazgos indican una mínima variabilidad entre las mediciones efectuadas en cada ruta. Este nivel de precisión refuerza la confiabilidad y credibilidad de los datos obtenidos, subrayando la coherencia de las mediciones y la solidez de los resultados.

Recomendaciones

- Ampliar el análisis para incluir más estaciones, lo que implica la incorporación de rutas adicionales, independientemente de su longitud total.
- Aumentar el tamaño de la muestra al incluir más participantes en el estudio. Al hacerlo, es importante garantizar que todas las bicicletas utilizadas compartan características similares.

- Comparar los datos recopilados con bicicletas eléctricas asistidas con diferentes capacidades de batería (kWh). Esto permitirá evaluar el impacto de la capacidad de la batería en la eficiencia de las bicicletas eléctricas.

Referencias

- Apostolou, D. (2020). Assessing the operation and different refueling cost scenarios of a fuel cell electric bicycle under low-pressure hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 23587–23602. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.071>
- Baylón Jaquez, A., Pedro, J., Sarmiento, M., Técnico, A., Saucedo, J., Evaluador, Á., Mendoza, A., & Saúl González, M. C. (2010). *UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ*.
- BICICUENCA S.A. (2019). *Bici Pública Cuenca*.
- Chalco, A. (2021). *Estimación de la demanda energética en el sistema de bicicleta pública de la ciudad de Cuenca*.
- CONBICI. (2018). *ESTADO DE LA BICI*. <https://conbici.org/estado-de-la-bici/intermodalidad#:~:text=Combinar%20la%20bici%20con%20otros,cotidianos%20o%20de%20los%20cicloturistas>
- De Coninck, P., Cárdenas, N., Breurec, C., Calderón, P., Zuluaga, M., & Villavicencio, C. (2023). *Política nacional de movilidad urbana sostenible*.
- Duarte, C. (2021, July 12). *ESTAS SON LAS CINCO CIUDADES DE EUROPA CON MÁS KILÓMETROS DE CARRIL BICI POR HABITANTE*. https://viajes.nationalgeographic.com.es/lifestyle/estas-son-cinco-ciudades-europa-mas-kilometros-carril-bici-por-habitante_17044
- Euro clima+. (2020). *Informe Anual euro clima+ 2019-2020*. <https://www.euroclima.org/seccion-publicaciones/tipo-de-documentos/informes-publicaciones/informe-anual-euroclima-2020/viewdocument/166>
- Giordano, A., Matthews, H. S., Baptista, P., & Fischbeck, P. (2022). Impacts of topography and weather barriers on commercial cargo bicycle energy using urban delivery crowdsourced cycling data. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103326. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103326>
- Hu, B., Zhong, Z., Zhang, Y., Sun, Y., Jiang, L., Dong, X., & Sun, H. (2022). Understanding the influencing factors of bicycle-sharing demand based on residents' trips. *Physical A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 586, 126472. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSA.2021.126472>
- Jerves Cobo, R., & Armijo Arcos, F. (2016). Análisis y revisión de la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Cuenca - Ecuador. *La Granja*, 23(1). <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.03>
- Ji, S., Cherry, C. R., Han, L. D., & Jordan, D. A. (2014). Electric bike sharing: Simulation of user demand and system availability. *Journal of Cleaner Production*, 85, 250–257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.024>

- Jose, K., Vargas, O., Yamid, C., & Mendieta, S. (2017). *Análisis comparativo de tiempos de desplazamiento e influencia de la longitud del recorrido entre bicicleta convencional y eBike en Bogotá*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil
- Lleras, N., Taddia, A., Ríos, A., Taddia, A., Pardo, C., Olivares, C., & Medina, C. (2019). *Banco Interamericano de Desarrollo*. www.iadb.org
- Luzuriaga, A. (2021). *Estimación de la demanda energética en el sistema de bicicleta pública de la ciudad de Cuenca, para las estaciones: El Vergel, Parque de la madre, El centenario, El farol y Universidad de Cuenca*.
- Mancheno, P., & Ormaza, C. (2015). *Plan de movilidad Cuenca 2015-2025*.
- Nissan Ecuador. (2023). *NUEVO NISSAN LEAF AUTONOMÍA Y RECARGA*.
- Palacios, L., & Sarmiento, C. (2018). *Estimación del consumo energético específico de la movilidad en transporte público y privado, de centros de educación superior en el cantón Cuenca*.
- Pardo, C., Moscoso, M., VanLaake, T., Quiñones, L., Pardo, C., & Hidalgo, D. (2020). *Transporte urbano sostenible en América Latina*.
- Paredes, P. (2021). *Estimación de la demanda energética en el sistema de bicicleta pública de la ciudad de Cuenca, para las estaciones: San Sebastián, Parque Calderón, La Merced, Víctor J. Cuesta y Portal Artesanal*.
- Ríos, R., Taddia, A., Pardo, C., & Lleras, N. (2015, febrero). *Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: Guía para impulsar el uso de la bicicleta*. <https://publications.iadb.org/es/ciclo-inclusion-en-america-latina-y-el-caribe-guia-para-impulsar-el-uso-de-la-bicicleta>
- Rodríguez, A., Ortiz, M., & Thomas, J. (2019). *Baterías de ion litio: presente y futuro*.
- Rodríguez, D. (2019). *MODELADO Y SIMULACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE CARGA DE BATERÍAS PARA PORTABILIDAD ENERGÉTICA EN BICICLETAS ELÉCTRICAS*.
- Sanmiguel-Rodríguez, A. (2019). *Analysis of the ages, routes, and minutes of use in the use of a shared bicycle system: the case of Vai Bike in Vila García de Arousa (Spain)*.
- Sarmiento, C. (2021). *Estimación de la demanda energética en el sistema de bicicleta pública de la ciudad de Cuenca, para las estaciones: Escuela Panamá, La concordia, El estadio, Unidad educativa La Salle y Universidad del Azuay*.
- Veliz, C. (2018). *Estudio de viabilidad de la movilidad con bicicletas eléctricas - Memoria*.
- Weinert, J. X., Burke, A. F., & Wei, X. (2007). Lead-acid and lithium-ion batteries for the Chinese electric bike market and implications on future technology advancement. *Journal of Powers Sources*, 172(2), 938–945. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.05.044>

Anexos

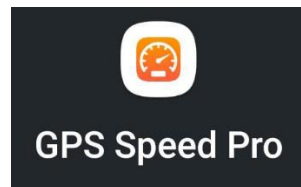
Anexo 1



Carga Batería



Batería Agotada



Vatímetro

Software usado

Anexo 2

Género	Edad	Peso	Experiencia	Ruta
Masculino	18	65	Nula	2
Masculino	50	80	Nula	3
Masculino	23	75	Nula	1
Masculino	28	80	Nula	3
Masculino	21	70	Nula	2
Femenino	25	60	Nula	1