



ESTUDIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA BICICLETA ELÉCTRICA URBANA CARGADA CON UNA ESTACIÓN DE CARGA SOLAR FOTOVOLTAICA AUTÓNOMA Y SU CUMPLIMIENTO CON LA REGULACIÓN ECUATORIANA No. ARCERNNR – 002/20

STUDY OF THE ENERGY EFFICIENCY OF AN URBAN E-BIKE CHARGED WITH A STANDALONE PHOTOVOLTAIC SOLAR CHARGING STATION AND ITS COMPLIANCE WITH THE ECUADORIAN GRID CODE No. ARCERNNR – 002/20

Vinicio Ñíguez-Morán^{1,*} , Edison Villa-Ávila¹ ,

Danny Ochoa-Correa² , Ciro Larco-Barros² , Rodrigo Sempertegui-Álvarez¹ 

Recibido: 02-08-2022, Recibido tras revisión: 20-10-2022, Aceptado: 10-11-2022, Publicado: 01-01-2023

Resumen

Las bicicletas eléctricas (*e-bikes*) son un medio de transporte sostenible emergente. Si se adoptan masivamente, ayudarían a enfrentar los desafíos de movilidad humana en las ciudades del mundo. En Cuenca, Ecuador, el Gobierno local construyó ciclovías (13,47 km) que conectan puntos estratégicos, para facilitar y fomentar la movilidad sostenible. Sin embargo, la implementación efectiva de las estrategias de electromovilidad a gran escala conlleva impactos en la red eléctrica, como el aumento de la demanda de energía y la posible disminución de su calidad debido a la distorsión armónica de la corriente de carga de la batería. El propósito de esta investigación es hacer una evaluación preliminar de dichos impactos, mediante el estudio de eficiencia energética de una *e-bike* urbana cargada con una estación solar fotovoltaica aislada, implementada en el Laboratorio de Micro-Red de la Universidad de Cuenca.

Abstract

E-bikes are an emerging sustainable means of transportation, if adopted massively, they can help face the challenges of human mobility in urban centers worldwide. In Cuenca, Ecuador, the local government built cycle routes (13.47 km) connecting strategic points to facilitate and encourage sustainable mobility. However, the effective implementation of the electromobility strategies at a large scale entails impacts on the power grid, like the increase in the energy demand and the possible decrease of the energy quality due to the harmonic distortion that characterizes the battery's charging current. This research aims to obtain a primary input to evaluate such impacts through an energy efficiency study of an urban e-bike charged by a standalone solar photovoltaic charging station implemented in the Microgrid Laboratory of Universidad de Cuenca.

^{1,*} Laboratorio de Micro-Red, Universidad de Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia ✉: vinicio.iniguez@ucuenca.edu.ec

² Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Ecuador.

Forma sugerida de citación: Ñíguez-Morán, V.; Villa-Ávila, E.; Ochoa-Correa, D.; Larco-Barros, C. y Sempertegui-Álvarez, R. "Estudio de eficiencia energética de una bicicleta eléctrica urbana cargada con una estación de carga solar fotovoltaica autónoma y su cumplimiento con la regulación ecuatoriana No. ARCERNNR – 002/20," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 29, pp. 46-57, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.04>.

La metodología incluye la caracterización experimental del régimen de carga de la batería, el cálculo de la eficiencia energética del vehículo y la evaluación del cumplimiento de la normativa ecuatoriana ARCERNNR-002/20. Los resultados muestran que el cargador de la batería implementa un régimen de carga estandarizado por normas alemanas, entregando 92 % de carga en 4,82 horas. La eficiencia energética promedio de la e-bike es 2,18 kWh/100 millas o 73,77 m/Wh, y una economía de combustible de 1545,1 MPGe. Finalmente, la magnitud de las primeras cuatro componentes armónicas impares y la distorsión armónica total de la corriente de carga supera los límites establecidos por la normativa.

Palabras clave: bicicleta eléctrica, electromovilidad, calidad de energía, batería de iones de litio, resolución N.º ARCERNNR 002/20, Est. DIN 41772

The methodology includes the experimental characterization of the battery's charging regime, the vehicle's energy efficiency calculation, and the evaluation of its compliance with Ecuadorian grid code No. ARCERNNR – 002/20. Results show that the battery's charger performs a charging regime standardized by German regulations, delivering 92% of charge in 4.82 hours. The e-bike's calculated average energy efficiency is 2.18 kWh/100 miles or 73.77 m/Wh, and a fuel economy of 1545.1 MPGe. Finally, the magnitude of the first four odd harmonic components and the total harmonic distortion of the charging current exceeds the limits established by the grid code in force.

Keywords: e-Bike, Electromobility, Power Quality, Lithium-Ion Batteries, Grid code No. ARCERNNR 002/20, Std. DIN 41772

1. Introducción

En la actualidad, muchos centros urbanos en el mundo están experimentando serios problemas de congestión vehicular. Este hecho tiene un impacto negativo en la calidad de vida de las personas. Su principal manifestación es la reducción progresiva en las velocidades de circulación, lo cual se traduce en incrementos en tiempos de viaje, consumo de combustibles fósiles, otros costos operativos y polución atmosférica, con respecto a un flujo vehicular sin embotellamientos [1].

Ante este problema, las autoridades, los diferentes actores sociales y los ciudadanos han utilizado algunas estrategias orientadas a mitigar los impactos mencionados previamente. Estas estrategias abordan diferentes aspectos, tales como aumentar la oferta de transporte público masivo (en términos de tarifas y rutas), restringir el acceso del transporte privado a los centros urbanos, promover flotas de vehículos energéticamente eficientes y modos de transporte de bajo impacto ambiental [2]. Entre las iniciativas que forman parte de esta última estrategia, la micromovilidad ha venido ganando relevancia en años recientes como una solución de transporte de uso creciente [3].

Micromovilidad se refiere al uso de una amplia variedad de vehículos livianos, privados o compartidos, que operan a bajas velocidades y se utilizan para viajes cortos. Estos vehículos incluyen bicicletas eléctricas (*e-bikes*), monopatines eléctricos (*e-scooters*) y motocicletas eléctricas. La manera como viajan las personas en áreas urbanas está cambiando rápidamente, a medida que este concepto es adoptado y promovido para obtener un sistema de transporte más sostenible [4].

La creciente popularidad de los medios de micromovilidad eléctrica ha despertado el interés de científicos alrededor del mundo, tal como se refleja en el número considerable de trabajos de investigación. Muchos artículos reportados en la literatura abordan los aspectos legislativos relacionados con la micromovilidad, motivados principalmente por el reporte «Global EV Outlook 2020 - Entering the decade of electric drive?» publicado por la Agencia Internacional de Energía (AIE) en 2020 [5].

Por ejemplo, los investigadores [6] mostraron que los países de la Unión Europea (UE) tienen diferentes marcos legales en relación con los medios de electromovilidad, que los consideran como un medio de microtransporte o transporte personal. Adicionalmente, este trabajo muestra que, en algunos países, los medios de electromovilidad tales como monopatines eléctricos no están definidos en las regulaciones, sino que aplican otras normas (por ejemplo, regulaciones para bicicletas). El hecho de que tales regulaciones consideren a los usuarios de medios de micromovilidad como peatones o ciclistas hace que se masifiquen en entornos urbanos, generando la necesidad de desarrollar legislación detallada para condicionar y administrar apropiadamente

el movimiento seguro de estos usuarios en las ciudades para evitar caos en el desplazamiento, tal como lo advierten los investigadores [7]. En este sentido, [8] presenta un estudio comparativo realizado en treinta ciudades europeas para evaluar los problemas de administración de monopatines eléctricos (*e-scooters*) en espacios urbanos. Los resultados muestran que el uso compartido de los medios de micromovilidad se hace cada vez más atractivo, obligando a los proveedores públicos de energía eléctrica a prepararse para suplir incrementos significativos de la cargabilidad en sus redes.

En el contexto de los Estados Unidos de América, los investigadores [9] muestran que la gente frecuentemente prefiere formas de micromovilidad eléctrica a los carros, en muchas ciudades estadounidenses. Además, en el mismo trabajo, los autores afirman que las formas de micromovilidad eléctrica podrían complementar al transporte público, haciendo énfasis en la integración modal y los beneficios sociales de introducir un modelo de uso compartido. Por otra parte, Ayyildiz [10] estudió el impacto de las variables temporales, tales como datos del clima, y variables invariantes en el tiempo, sobre la demanda esperada de medios de micromovilidad (en este caso tomaron monopatines eléctricos) en Chicago. Se enfocó en determinar la ubicación de estaciones de carga de monopatines eléctricos, y encontró que los factores económicos fueron decisivos en esta tarea. De forma similar, Der Lin *et al.* [11] consideraron un modelo estocástico multiobjetivo para asignar la ubicación de estaciones de intercambio de baterías de monopatines eléctricos. El estudio de Chen *et al.* [12] se enfocó en encontrar un modelo de optimización para definir la ubicación de múltiples estaciones de carga de diferentes características técnicas, para vehículos eléctricos de micromovilidad.

Por otra parte, en el contexto latinoamericano, [13,14] reportan experiencias de electromovilidad en países tales como Brasil y Uruguay, respectivamente, mientras que el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) [15] presenta una perspectiva más general de América Latina en esta materia.

En el contexto ecuatoriano, desde 2020 las ciudades más pobladas han experimentado un incremento significativo en la demanda y uso de vehículos eléctricos para satisfacer sus necesidades de movilidad [16]. De acuerdo con [17,18], la pandemia de COVID-19 estimuló este crecimiento en la electromovilidad, lo cual afectó el transporte urbano convencional (buses y taxis), tanto en términos de disponibilidad como de un mayor riesgo de contagio en estos medios masivos de movilidad humana. Esta realidad también es percibida a nivel global.

A pesar de que las autoridades gubernamentales han aliviado sustancialmente las restricciones sanitarias establecidas durante la pandemia y han reactivado los servicios de transporte público y privado, las

estadísticas muestran que la preferencia por el uso de bicicletas y monopatinés eléctricos se ha mantenido en las principales ciudades. Este hecho apunta a un inminente cambio de paradigma en la movilidad que no ha sido ignorado ni por Gobiernos locales, ni por compañías, ni por empresas especializadas en movilidad. En la ciudad de Cuenca, la tercera más poblada de Ecuador, su Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD-Cuenca) ha tomado acciones a través de un Plan de Movilidad [19], para facilitar y promover la movilidad sostenible. Dentro de este plan, existen tres hitos que vale la pena mencionar. Primero, la construcción de 13,47 km de ciclovías que conectan los puntos más estratégicos de la ciudad [20]. Segundo, el inicio de operaciones del Tranvía de Cuenca, el sistema de transporte masivo con 21,4 km de vías [21]. Por último, la implementación de estaciones de carga en uno de los parques emblemáticos de la ciudad [22].

La Universidad de Cuenca, institución pública de educación superior, lanzó su programa MoverU, cuyo propósito es desarrollar un sistema de movilidad sostenible basado en evidencia científica, que contribuya a las propuestas y acciones para resolver problemas de transporte urbano, con el fin de mejorar la calidad de vida de la gente. Dentro del *dossier* de iniciativas del programa, es posible identificar proyectos de micromovilidad que buscan promover el uso de medios de transporte ligero con asistencia eléctrica. Adicionalmente, el Centro Científico Tecnológico y de Investigación Balzay (CCTI-B) de la Universidad de Cuenca tiene un laboratorio de microrred eléctrica. Este laboratorio es un banco de pruebas propicio para realizar estudios sobre el uso y gestión de fuentes de energía renovables, para satisfacer las necesidades de energía del ser humano de una manera limpia y sostenible. El laboratorio cuenta con diferentes sistemas de generación eléctrica: solar fotovoltaica, eólica, hidráulica, pilas de combustible, etc.; diferentes sistemas de almacenamiento de energía: baterías electroquímicas, baterías de flujo de vanadio, producción de hidrógeno por electrólisis, entre otras; y diferentes usos finales de la energía producida/almacenada: las instalaciones eléctricas del edificio donde está el laboratorio, cargas eléctricas programables (para la emulación de perfiles de consumo) y estaciones de carga de vehículos eléctricos [23].

Todas las características mencionadas previamente hacen del Laboratorio de Micro-Red eléctrica del CCTI-B una entidad autosuficiente desde el punto de vista energético, con un amplio rango de oportunidades para la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación. De acuerdo con las conclusiones reportadas [24], el laboratorio es un *benchmark* latinoamericano debido a que es el mejor equipado de la región. En el equipamiento técnico disponible, resaltan tres vehículos eléctricos (un carro y dos furgonetas), cinco bicicletas eléctricas urbanas, una bicicleta eléctrica

montañera y dos motocicletas eléctricas. Esto ha motivado la apertura de una línea de investigación enfocada en la electromovilidad, el objeto de este trabajo de investigación.

Desde un punto de vista eminentemente técnico, la implementación efectiva de las estrategias de micromovilidad aquí mencionadas implica una serie de impactos en la red eléctrica. El más evidente es el aumento en la demanda de energía eléctrica, causado por la conexión masiva de vehículos en diferentes puntos de la red para cargar sus baterías. Este es un asunto de gran preocupación para las compañías distribuidoras de electricidad. En particular, es esencial caracterizar el perfil de consumo de corto plazo de usuarios de micromovilidad eléctrica esparcidos por toda el área de cobertura del servicio eléctrico de la ciudad. Esta información permite evaluar los posibles efectos de los sistemas de carga de baterías sobre la calidad de potencia, especialmente cuando hay una gran cantidad de usuarios de estos sistemas. Una caracterización de este consumo de energía suministrará a la compañía de distribución información invaluable para la planificación, y para la realización de estudios del impacto que tienen las cargas destinadas a la electromovilidad sobre la red de consumidores residenciales.

Este trabajo presenta un estudio detallado para calcular la eficiencia energética de un modelo comercial de bicicleta eléctrica urbana, cargada a través de una estación de carga aislada basada en una fuente solar fotovoltaica, implementada con equipos del inventario del Laboratorio de Micro-Red eléctrica del CCTI-B. Las pruebas de autonomía eléctrica de este medio de transporte eléctrico se realizan a través de recorridos dentro de la ciudad de Cuenca, tratando de usar las ciclovías existentes en la mayoría de los casos.

Además de presentar la metodología utilizada para estimar la autonomía de la bicicleta eléctrica, este artículo describe un procedimiento para caracterizar el perfil eléctrico de consumo de energía durante las horas de carga de su batería. Adicionalmente, contiene una evaluación del efecto sobre la calidad de la energía suministrada por la red, evaluado de acuerdo con la Regulación Ecuatoriana ARCERNNR – 002/20. Este estudio está orientado a obtener información preliminar para evaluar el impacto que tiene la masificación de estos nuevos actores sobre la red de distribución eléctrica, y para afrontar este nuevo paradigma de movilidad urbana.

2. Materiales y métodos

2.1. Bicicleta eléctrica (*e-bike*) bajo estudio

El vehículo eléctrico bajo estudio es una bicicleta eléctrica (*e-bike*) marca ECOMOVE, modelo TIV, como la que se muestra en la Figura 1. Esta bicicleta pertenece al Laboratorio de Micro-Red, parte del CCTI-B de la

Universidad de Cuenca. Las pruebas eléctricas realizadas sobre ella, que se describen a continuación, fueron no invasivas. En otras palabras, nunca se manipularon los componentes internos del vehículo.

Esta *e-bike* urbana pesa 25 kg y está hecha de aleación de aluminio 6061. Tiene una batería de ion-litio de 36 V/10 Ah, y en la rueda trasera tiene un motor hub sin engranajes y sin escobillas de 36 V / 250 W. Alcanza una velocidad máxima de 28 km/h y una autonomía de 30 km cuando se conduce en modo eléctrico de asistencia.



Figura 1. *E-bike* ECOMOVE modelo TIV bajo estudio

La capacidad nominal de almacenamiento de energía de la batería no aparece en la hoja de datos del fabricante. Sin embargo, haciendo el cálculo con la capacidad de carga (10 Ah) y el voltaje promedio de la batería (36 V_{DC}), se obtuvo 0,360 kWh.

El cargador de la batería es modelo KYLC084V42J – Class II, fabricado por WuXi KeYu Electronic Technology Co., Ltd., y diseñado para baterías recargables de ion-litio de 42 V. La entrada AC del dispositivo soporta un voltaje nominal de 100 a 240 V_{AC}, a una frecuencia de 50 a 60 Hz, y una corriente RMS máxima de 1.8 A. La salida DC entrega 42 V_{DC} y una corriente promedio máxima de 2 A (con fusible de protección T/3,15 A/250 V, de acción lenta).

2.2. Ruta planificada para descargar la batería de la *e-bike*

Se planificó una ruta de 34 km (aprox.), sobre la base de lo que permiten las ciclovías de la ciudad de Cuenca. El Laboratorio de Micro-Red, ubicado en el Campus Balzay, fue el punto de partida y llegada. Un reloj con GPS se utilizó para calcular la distancia real recorrida. Este dispositivo guarda la data de geolocalización y otros parámetros de interés para el usuario, tal como la velocidad lineal de movimiento (km/h) y la frecuencia cardíaca. La Figura 2 muestra la ruta completa, con cinco puntos de referencia identificados.

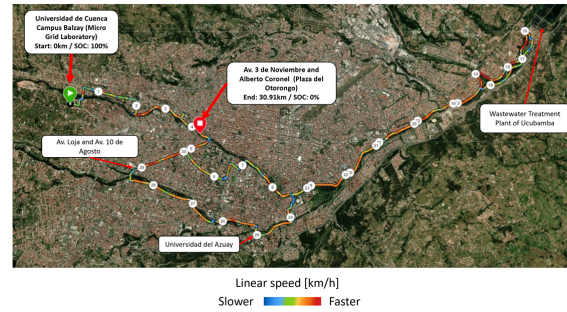


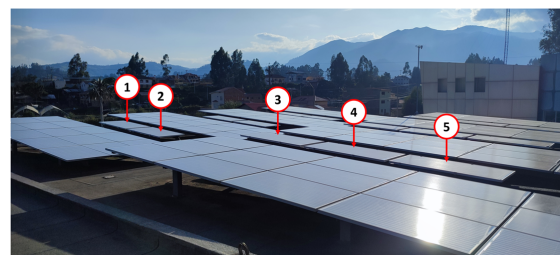
Figura 2. Ruta recorrida con la bicicleta eléctrica. Los círculos blancos con números identifican cada kilómetro recorrido. La data de geolocalización fue registrada con el GPS

Estos puntos son la partida, donde la batería está completamente cargada, es decir, el estado de carga disponible (SOC, state of charge en inglés) es 100 % (SOC = 100 %); la llegada, donde la batería está completamente descargada (SOC = 0 %), y ya no es posible utilizar el modo eléctrico asistido de la *e-bike*; y tres puntos de referencia adicionales para que el lector pueda reconocer fácilmente la ruta recorrida.

2.3. Estación de carga solar fotovoltaica autónoma

Para recargar la batería de la *e-bike*, se implementó una estación de carga solar fotovoltaica aislada de la red de potencia, mediante un sistema de almacenamiento y gestión de energía Ampere Square Pro (ASP) basado en baterías de litio.

El ASP tiene los siguientes cinco componentes principales: una batería (BT) de ion-litio de 6 kWh, un inversor (INV) bidireccional híbrido de 3 kW para realizar las conversiones de potencia DC-AC y AC-DC, un sistema de gestión de energía (EMS, energy management system) que administra la energía para regular los ciclos de carga/descarga del dispositivo, un medidor bidireccional de energía para registrar generación y consumo, y protecciones eléctricas (B1, B2, . . . , y B5) para proteger los componentes principales y ejecutar acciones de mando.

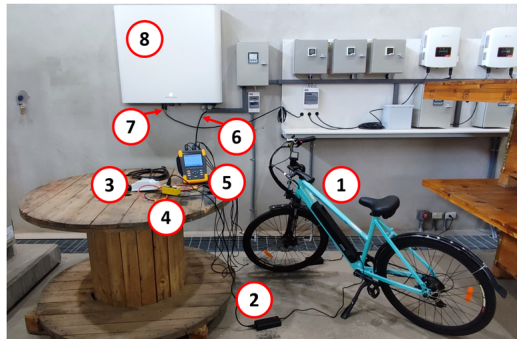


1, 2, 3, 4, and 5: polycrystalline solar panels model A-335P GS manufactured by ATERSA

Figura 3. Paneles solares instalados en la terraza del Laboratorio de Micro-Red. Los cinco paneles numerados en la foto están conectados en serie a la entrada de la cadena PV 1 del sistema de almacenamiento de energía Ampere Square Pro.

Cinco paneles solares policristalinos de 38 V y potencia máxima de 335 W conectados en serie, suministran la potencia al ASP. Los paneles están instalados en el techo del edificio de laboratorio, como puede observarse en la Figura 3.

La Figura 4 muestra la estación de carga solar fotovoltaica autónoma, señalando sus componentes principales. La fotografía muestra el equipo de medición instalado a la salida de la estación de carga.



1. E-bike.
2. Battery charger.
3. Outlet at 127 VAC/60Hz.
4. Thermomagnetic protection.
5. Power Quality and Energy Analyzer Fluke 435 Series II.
6. AMPERE Square PRO's output at 127 VAC/60Hz.
7. AMPERE Square PRO's input (PV string 1), 190 Vdc at maximum power, 1675W, from the 5 series-connected solar panels.
8. AMPERE Square PRO.

Figura 4. Estación de carga solar fotovoltaica autónoma para *e-bikes* implementada en el Laboratorio de Micro-Red. La bicicleta bajo estudio está siendo recargada.

La Figura 5 muestra el diagrama eléctrico de la estación de carga autónoma. Un analizador de calidad de energía que cumple con los estándares IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-30 e IEEE Std 519-2014, mide el consumo de energía de la *e-bike* y registra las variables de interés.

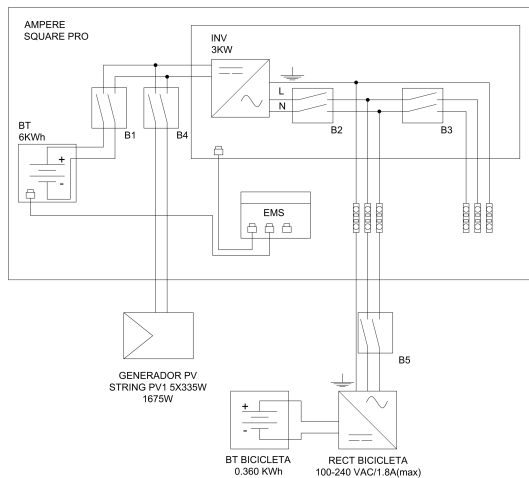


Figura 5. Diagrama eléctrico de la estación de carga solar fotovoltaica autónoma implementada en el Laboratorio de Micro-Red [25].

La única carga conectada es la *e-bike* bajo estudio. El analizador opera en modo de registro para adquirir las mediciones de un sistema AC monofásico con voltaje nominal línea-neutro de 127 VRMS, utilizando dos terminales de voltaje y dos sondas de corriente (una para el neutro), con un intervalo de registro de un segundo. Las variables eléctricas registradas son voltaje línea-a-neutro (L-N), corriente de fase, frecuencia, factor de potencia de distorsión, factor de potencia de desplazamiento, distorsión armónica total de corriente y voltaje, componentes armónicos (H2, H3, ..., H11) de corriente y voltaje, factor de cresta de corriente y voltaje, flicker, potencia activa, potencia aparente, y energía activa consumida (Wh).

2.4. Normativa ARCERNNR-002/20

La normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20 titulada Calidad del Servicio de Distribución y Comercialización de Electricidad tiene el propósito de «establecer los indicadores, índices y límites de calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica; y definir los procedimientos de medición, registro y evaluación que deben ser cumplidos por las compañías de distribución de electricidad y los consumidores, según sea apropiado» [26, p. 4].

Para este trabajo de investigación, el atributo de calidad de interés está en el lado del consumidor, establecido en la sección 5.2 de [26] como Aspecto de Calidad para el Consumidor y evaluado a través de la distorsión armónica de corriente. De acuerdo con la sección 29 de [26], los índices para evaluar la distorsión armónica individual de corriente y su distorsión de demanda total (también conocida como la distorsión armónica total de corriente, THD, total harmonic distortion en inglés) se calcula como sigue:

$$I_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \cdot \sum_{i=0}^{200} (I_{h,i})^2} \quad (1)$$

$$DI_{h,k} = \frac{I_{h,k}}{I_{h,1}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

$$THD_k = \left[\frac{1}{I_{h,1}} \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{h,k})^2} \right] \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

donde $I_{h,k}$ es el h -ésimo armónico de corriente en el k -ésimo intervalo de 10 minutos, según lo establecido en el estándar IEEE Std 519-2014; $I_{h,i}$ es el valor efectivo (RMS) del h -ésimo armónico de corriente (para $h = 2, 3, \dots, 50$) medido cada tres segundos (para $i = 1, 2, 3, \dots, 200$); $DI_{h,k}$ es el factor individual de distorsión del h -ésimo armónico de corriente (para $h = 2, 3, \dots, 50$) en el k -ésimo intervalo de 10 minutos; THD_k es la distorsión armónica total de corriente en el k -ésimo intervalo de 10 minutos; e $I_{h,1}$ es el valor

efectivo (RMS) de la componente fundamental de la corriente (60 Hz).

La Tabla 1 muestra los niveles máximos para la distorsión armónica individual y total de la corriente, tomados de la sección 29.2 de [26], solo hasta la decimoseptima componente armónica para este estudio.

Tabla 1. Niveles máximos para los componentes armónicos impares de las corrientes ^a, expresados como porcentaje de la máxima corriente demandada a la frecuencia fundamental (60 Hz)

I_{CC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	TDD (THD-A)
< 20 ^b	4.0	2.0	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	15.0
> 1000	15.0	7.0	20.0

^a Los límites para los armónicos pares son el 25 % de los límites mostrados en esta tabla.

^b Todos los equipos están limitados a estos valores de distorsión de corriente, donde I_{CC} = máxima corriente de cortocircuito en el punto de acoplamiento común (PCC, point of common coupling en inglés); e I_L = máxima corriente de carga a la frecuencia fundamental (60 Hz) [26].

La sección 29.4 de la normativa establece que, en el punto de medición, los consumidores cumplen con el factor de distorsión armónica individual de la corriente $DI_{h,k}$ y el factor de distorsión armónica total de la corriente THD_k , calculados utilizando las ecuaciones (1), (2), y (3), cuando 95 % o más de los datos registrados durante un período de evaluación de al menos siete días están dentro de los límites especificados en la Tabla 1.

Este trabajo de investigación utiliza los índices y límites especificados en la normativa ecuatoriana [26], para analizar el impacto del proceso de carga de la *e-bike* sobre la red eléctrica, procesando los datos del régimen de carga completo de la batería de ion litio, el cual toma pocas horas para completarse.

3. Resultados y discusión

Uno de los técnicos del Laboratorio de Micro-Red (de género masculino, 36 años de edad, 73 kg de peso y 1,73 m de estatura) utilizó la *e-bike* bajo estudio para recorrer la ruta previamente planificada, empleando únicamente el modo eléctrico de asistencia del vehículo. Toda la energía eléctrica almacenada en la batería se agotó luego de una distancia de 30,91 km en dos horas, diez minutos y treinta y cinco segundos (02:10:35), con una velocidad lineal promedio de 14,2 km/h. Por tanto, el experimento alcanzó una descarga completa durante la operación ordinaria de la batería.

El proceso de carga de la batería se inició en el Laboratorio de Micro-Red, conectando el cargador como la única carga de la estación solar fotovoltaica autónoma. Es necesario mencionar que el cargador permaneció conectado, incluso luego que se encendió

la luz indicadora de carga completa, con el fin de registrar datos del último estado de carga de la batería, conocido como estado de carga flotante. A continuación, se presenta el análisis de la data adquirida por el analizador de calidad de energía.

3.1. Análisis de calidad de energía

El proceso de carga de la batería de ion litio duró 6,77 horas (06:46:06), y el analizador tomó 24 366 mediciones de las variables eléctricas de interés. Los valores medidos promedio de los voltajes RMS fase-a-neutro (V_{F-N}) conectados a la entrada del cargador de la batería son 127,24 V a una frecuencia (f) de 59,95 Hz. El equipo registró un factor de cresta promedio (CF-V) de 1,42, con un valor máximo de 1,43 a lo largo del intervalo de medición completo.

Con respecto a la corriente de fase AC RMS (I_F), el análisis de las mediciones promedio registradas muestra que el cargador implementó un régimen de carga denominado IUoI, especificado por los estándares alemanes DIN 41772 [27], Suplemento 1 a DIN 41772 [28], y DIN 41773-1 [29]. El objetivo de este régimen estandarizado es cargar la batería en un tiempo relativamente corto sin afectar su vida útil, y mantener la carga en la batería mientras el cargador permanezca conectado. La data muestra que el régimen de carga implementado por el cargador de la *e-bike* bajo estudio consiste de tres etapas bien definidas (ver Figura 6). A continuación, se presenta una breve descripción de estas etapas.

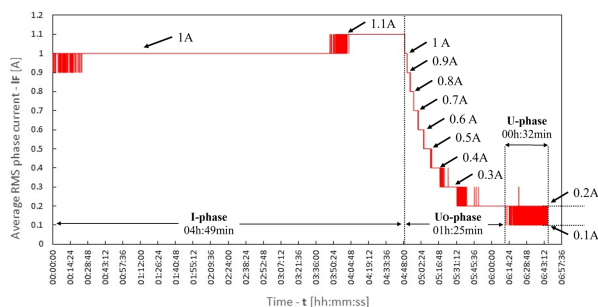


Figura 6. Los datos de corriente de fase (I_F) RMS promedio registrados a lo largo del período de carga muestran las tres etapas del régimen de carga IUoI

Fase-I. Es conocida como la etapa de carga masiva. El cargador suministra una corriente de carga constante a la batería cuando hay una descarga profunda. El voltaje se incrementa sin exceder U_{max} (el cual puede ser un valor fijo o dependiente de la temperatura), y la batería absorbe la carga. Cuando los terminales de la batería alcanzan U_{max} , el cargador pasa a la fase U_O .

El cargador operó en la etapa fase-I durante 4 horas y 49 minutos; la corriente de fase RMS I_F aplicada fue 1 A, la potencia activa promedio entregada fue

81,30 W, y la estación de carga suministró 385 Wh de energía activa al cargador de la *e-bike*.

Fase-U_O. Es conocida como la etapa de impulso a voltaje constante o etapa de absorción. Aquí el cargador mantiene un sobrevoltaje constante en los terminales de la batería, mientras la corriente de carga disminuye. Este valor de voltaje no es seguro para una aplicación indefinida, pero permite cargar la batería en menos tiempo. Según [29], de acuerdo con las condiciones de diseño y de operación de la batería, el voltaje máximo debe estar entre 2,33 V y 2,40 V por celda. Esta fase termina cuando la corriente de carga alcanza un umbral mínimo I_{\min} , y el cargador pasa a la fase-U.

En esta etapa, la corriente de fase I_F RMS promedio aplicada disminuye de 1,1 A a 0,2 A (I_{\min}), en 1 hora y 25 minutos. La Figura 6 muestra que la declinación de la corriente de carga ocurre en pasos de 0,1 A. A lo largo de la fase-U_O, solo se suministraron 34 Wh para cargar la batería de la *e-bike*. En consecuencia, al final de la etapa, la energía activa total suministrada por la estación de carga al cargador es 419 Wh, en 6 horas y 14 minutos. En este punto, la batería está completamente cargada (SOC = 100 %).

Fase-U. Esta última etapa se denomina la etapa de carga flotante. El cargador aplica un voltaje que puede mantenerse de manera segura por largos períodos, sin afectar significativamente la vida útil de la batería. En esta etapa, la corriente disminuye a un valor residual, haciendo posible compensar la autodescarga de la batería.

Dado que el cargador permaneció conectado incluso luego que se encendió la luz indicadora de carga completa, con el fin de registrar los datos de la etapa fase-U, fue posible determinar que el valor residual de la corriente de carga es 0,1 A. La Figura 6 muestra que, en esta etapa, la corriente de carga permanece en 0,1 A y conmuta a 0,2 A por pocos segundos, para compensar la autodescarga de la batería. Este comportamiento sigue ocurriendo mientras el cargador permanece conectado a la estación. En 32 minutos, la estación suministró solo 3 Wh al cargador para la compensación.

Un hecho bien conocido acerca de las baterías ion-litio es que no necesitan cargarse un 100 % para prolongar su vida útil, debido a que evitan el sobrevoltaje de la segunda etapa del régimen de carga mostrado en la Figura 6. Por otra parte, dado que las mediciones prueban que 91,89 % del total de energía eléctrica suministrada por la estación de carga al cargador (385 Wh de 419 Wh, ver Figura 7) se entrega en la fase-I, el análisis que sigue se enfoca en los parámetros eléctricos de interés registrados únicamente durante la fase-I.

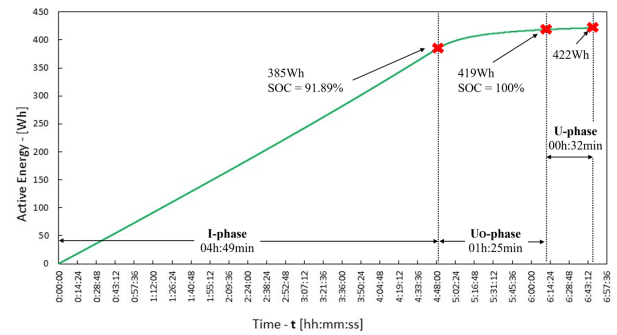


Figura 7. Energía activa, medida en Wh, entregada al cargador durante el proceso de carga

Con respecto a la distorsión armónica total, THD-V para el voltaje V_{F-N} y THD-A para la corriente de carga I_F , los valores medidos fueron 4,71 % y 106,01 %, respectivamente. El factor de potencia total del cargador es 0,62, calculado multiplicando los valores promedio registrados de factor de potencia de desplazamiento (PF, *displacement power factor* en inglés) y factor de potencia de distorsión (DPF, *distortion power factor* en inglés), 0,63 y 0,99, respectivamente, dado que el cargador es una carga no lineal.

Las componentes armónicas impares de la corriente de fase I_F , son responsables de los altos valores de THD-A y el bajo valor de factor de potencia total. Principalmente, los componentes H3, H5 y H7, cuyas magnitudes promedio son 80,71 %, 57,14 % y 32,41 %, respectivamente, de la fundamental. La Figura 8 muestra el comportamiento de las primeras cinco componentes impares de I_F durante el régimen de carga completo.

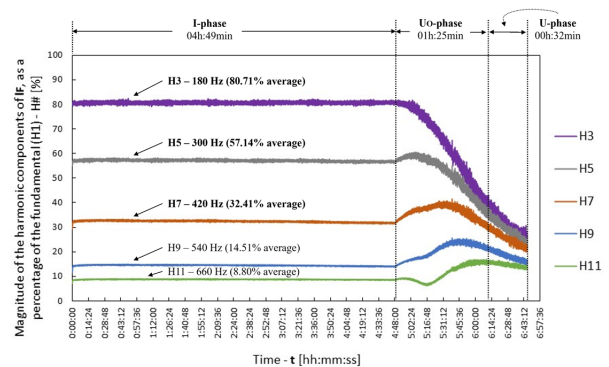


Figura 8. Valores promedio medidos de las componentes armónicas impares (H3, H5, H7, H9 y H11) de la corriente de carga I_F . El equipo de medición calcula estos y otros datos en una ventana de tiempo de 200 ms, de acuerdo con el estándar IEC 61000-4-7 para los algoritmos de transformada rápida de Fourier (FTT, *fast Fourier transform* en inglés)

A las 3 horas y 51 minutos de carga durante la fase-I, la onda de la corriente de carga I_F mostrada en la Figura 9 resulta del efecto de sus componentes armónicas impares. El alto valor de THD-A tiene sentido

al solo mirar la onda. Con respecto a la onda de voltaje AC RMS de fase-a-neutro V_{F-N} , que también se muestra en la Figura 9, es posible notar su cercanía a una sinusoidal perfecta. Sin embargo, los valores absolutos instantáneos de V_{F-N} disminuyen ligeramente cuando I_F aumenta a su valor máximo positivo y valor mínimo negativo (resaltados con círculos azules en la Figura 8), lo cual justifica el 4,71 % medido de THD-V.

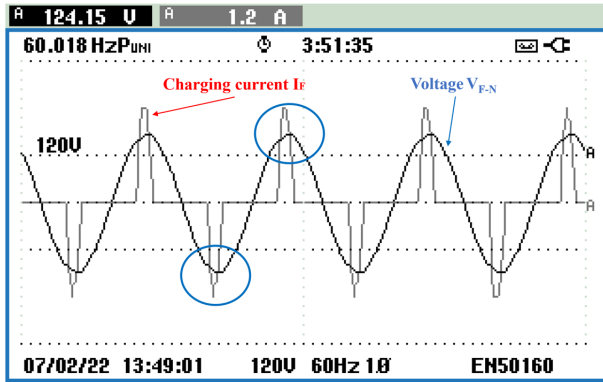


Figura 9. Ondas de corriente de carga I_F y voltaje de fase-a-neutro V_{F-N} tomados por el osciloscopio del analizador de calidad de energía luego de 3 horas y 51 minutos de carga durante la fase-I

Con respecto a la normativa ecuatoriana ARCONNR 002/20, los límites para la magnitud de las componentes armónicas impares de las corrientes individuales de carga expresadas como porcentaje de la componente fundamental, y su distorsión armónica total son diferentes para diferentes rangos de la relación entre la máxima corriente de cortocircuito en el punto de acoplamiento común, y la máxima corriente de carga de frecuencia fundamental (H1), denominada I_{CC}/I_L (ver Tabla 1). La normativa obliga a que la magnitud de las primeras cuatro armónicas impares no puede exceder el 15 % en todos los rangos. De manera similar, la distorsión armónica total de corriente (THD-A) nunca debe exceder el 20 %.

En este contexto, las mediciones de los parámetros mencionados previamente ($H3 = 80,71$ %, $H5 = 57,14$ %, $H7 = 32,41$ %, $H9 = 14,51$ %, y $THD-A = 106,01$ %) exceden los límites establecidos por la normativa en relación con el aspecto de calidad del consumidor. Esto debe ser tomado en cuenta al evaluar el impacto de una utilización futura a gran escala de *e-bikes* (marca y modelo bajo estudio, y otras) en Ecuador.

3.2. Análisis de eficiencia energética

Según [30], los hábitos de los usuarios determinan la eficiencia energética de una *e-bike*. También mencionan que no existe una métrica única para estudiar este parámetro crítico. Sin embargo, sugiere que los fabricantes utilizan con frecuencia el número de kWh por

cada 100 millas para informar los rangos de eficiencia energética de sus productos. Por tanto, los 419 Wh (0,419 kWh) absorbidos por el cargador en 6 horas y 14 minutos al final de la fase- U_O es la capacidad real de almacenamiento de energía eléctrica de la batería (SOC = 100 %), suponiendo que las pérdidas en el cargador son despreciables. Dado que esta cantidad de energía eléctrica se agotó luego de un recorrido de 30,91 km (19,21 millas) durante el experimento, la eficiencia promedio de la *e-bike* bajo estudio es:

$$\eta_{E(kWh-100millas)} = \frac{E}{d} \cdot 100 \quad (4)$$

Donde η_E es la eficiencia energética promedio medida en kWh/100 millas, d es la distancia en millas, y E es la energía eléctrica, en kWh, almacenada en la batería cuando SOC = 100 %. El resultado luego de sustituir los términos en (4) es 2,18 kWh/100 millas. Con la tarifa promedio nacional de Ecuador de 0,092 USD por kWh, el costo de recorrer 100 millas con la *e-bike* bajo estudio es 0,2 USD (20 centavos).

El número de metros que puede recorrer la *e-bike* por vatio-hora de energía eléctrica almacenada en su batería también es útil para evaluar la eficiencia energética, que puede calcularse como:

$$\eta_{E(m/Wh)} = \frac{E}{d} \quad (5)$$

Con $d = 30\,910$ m y $E = 419$ Wh, el cálculo resulta en 73,77 m/Wh para el vehículo bajo estudio.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA, *Environmental Protection Agency* en inglés) de Estados Unidos de América define el término millas por galón equivalente o MPGe para calificar la eficiencia o economía de combustible de los vehículos eléctricos (EV, *electric vehicles* en inglés). Este término compara la cantidad de energía eléctrica que se requiere para cargar un EV a la energía suministrada por un galón de gasolina. De acuerdo con estimaciones de la EPA, la energía suministrada por un galón de gasolina es 33,7 kWh. Por tanto, los 0,419 kWh requeridos para cargar completamente la *e-bike* bajo estudio equivalen a 0,0124 galones de gasolina. Dado que la *e-bike* recorrió 19,21 millas con esa cantidad de energía, su MPGe se calcula como:

$$MPGe = \frac{d}{G} \quad (6)$$

Donde d es la distancia cubierta por la *e-bike*, medida en millas, y G son los galones equivalentes de gasolina calculados previamente. La sustitución de términos resulta en 1545,1 MPGe, lo cual es 12 veces la economía de combustible (132 MPGe) de un Tesla Modelo 3 RWD 2022, el EV mejor ranqueado en la Guía de Economía de Combustible Modelo Año 2022 (Fuel Economy Guide Model Year 2022) del Departamento de Energía de Estados Unidos [31]. La última

afirmación ejemplifica los potenciales beneficios del uso de vehículos de micromovilidad.

4. Conclusiones

La investigación realizada en el Laboratorio de Micro-Red de la Universidad de Cuenca analiza el comportamiento energético de una bicicleta eléctrica (*e-bike*) urbana de la marca ECOMOVE, modelo TIV, en una ruta de 30,91 km dentro del área urbana de la ciudad de Cuenca, operando únicamente en modo eléctrico de asistencia. En el laboratorio se implementó una estación de carga solar fotovoltaica aislada de la red eléctrica. La estación tiene cinco paneles solares policristalinos, de 335 W cada uno, conectados en serie, un sistema de almacenamiento y gestión de energía, y protecciones eléctricas. Se utilizó un analizador de calidad de energía para estimar el consumo de energía de la *e-bike*, y registrar las variables de interés.

El análisis de los datos de corriente AC RMS promedio muestra que el cargador de la batería de la *e-bike* aplica un régimen de carga IUoI, estandarizado por las normativas alemanas DIN41772, Suplemento 1 a DIN 41772 y DIN 41773-1, con tres etapas bien definidas. Primero está la etapa de carga masiva (Fase-I), en la cual el cargador recibe una corriente constante de 1 A por cerca de 4,82 horas, entrega 91,89 % de la carga a la batería, y eleva el voltaje en sus terminales. Luego sigue la etapa de impulso a voltaje constante (Fase-U_O), en la cual la corriente de carga disminuye en pasos discretos de 0,1 A, desde 1,1 A a un valor mínimo de 0,2 A, en alrededor de 1,42 horas, y solo entrega el 8,11 % de la carga total. Finalmente, el cargador alcanza el estado de carga flotante (Fase-U) para compensar únicamente la autodescarga de la batería, aplicando 0,2 A por cortos períodos de tiempo cuando así se requiere. En este punto, el lector tiene un modelo característico del perfil de carga de un medio de transporte de micromovilidad, lo cual permitirá realizar estudios de la red eléctrica relacionados con la masificación de este tipo de elemento consumidor de potencia.

Además, las mediciones muestran que la capacidad real de la batería para almacenar energía eléctrica es de 419 Wh, aproximadamente. Esta capacidad proporciona una autonomía de 30,91 km, medidos a lo largo de una ruta urbana planificada previamente, y utilizando solamente el modo eléctrico de asistencia del vehículo. Por lo tanto, la eficiencia energética promedio de la *e-bike* bajo estudio es 2,18 kWh/100 millas o 73,77 m/Wh, y una economía de combustible de 1545,1 MPGe. Por tanto, el costo de recorrer 100 millas es 0,2 USD (20 centavos).

Alrededor de 92 % de la energía eléctrica total suministrada por la estación de carga al cargador, 385 Wh de 419 Wh, ocurrió en la primera etapa del régimen

de carga (Fase-I). La corriente de carga es constante y presenta su valor promedio más alto, 1 A. Por tanto, los datos de la fase-I son los más relevantes para el análisis de la calidad de energía.

El análisis de datos prueba que el factor de potencia total del cargador es 0,62, y que la distorsión armónica total de la corriente de carga (THD-A) es 160,01 %, debido principalmente a sus tres primeros componentes armónicos impares, H3, H5 y H7, cuyas magnitudes promedio son 80,71 %, 57,14 % y 32,41 %, respectivamente, de la magnitud de la componente a la frecuencia fundamental. La onda de voltaje está muy cerca de ser una sinusoidal perfecta, lo cual se verifica por una distorsión armónica total de 4,71 %.

De acuerdo con las especificaciones técnicas para la evaluación del aspecto de calidad para el consumidor según la normativa ecuatoriana ARCERNNR 002/20, las magnitudes de las componentes armónicas individuales de la corriente de carga expresadas como porcentajes de la fundamental (H3 = 80,71 %, H5 = 57,14 %, H7 = 32,41 %, y H9 = 14,51 %), y la distorsión armónica total de la corriente de carga (THD-A = 106,01 %), están bastante por encima de los límites establecidos por la normativa. Para una adopción futura a gran escala de las *e-bikes* como medio de transporte en los centros urbanos de Ecuador, debe verificarse de antemano el cumplimiento de la ley vigente por parte del cargador.

Agradecimientos

El trabajo documentado en este manuscrito es parte de las actividades realizadas en el marco del proyecto titulado Movilidad eléctrica: retos, limitaciones y plan de implementación en el régimen especial de la provincia de Galápagos enfocada en el desarrollo sostenible y su factibilidad en la Ciudad de Cuenca, II Concurso de Proyectos de Investigación – Vinculación, Vicerrectorado de Investigación y la Dirección de Vinculación con la Sociedad de la Universidad de Cuenca. Los autores agradecen a la Universidad de Cuenca por facilitar el acceso a las instalaciones del Laboratorio de Micro-Red del Centro Científico Tecnológico y de Investigación Balzay (CCTI-B), por permitirnos utilizar sus equipos, y por autorizar a su personal a proporcionarnos el apoyo técnico necesario para llevar a cabo los experimentos descritos en este artículo.

Referencias

- [1] A. Bull, *Congestión de tránsito: el problema y cómo enfrentarlo*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Naciones Unidas, 2003. [Online]. Available: <https://bit.ly/3TW587t>

- [2] I. Thomson and A. Bull, *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Recursos Naturales e Infraestructura, Unidad de Transporte, Naciones Unidas, 2001. [Online]. Available: <https://bit.ly/3TW587t>
- [3] P. Felipe-Falgas, C. Madrid-Lopez, and O. Marquet, “Assessing environmental performance of micromobility using lca and self-reported modal change: The case of shared e-bikes, e-scooters, and e-mopeds in barcelona,” *Sustainability*, vol. 14, no. 7, p. 4139, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/SU14074139>
- [4] M. Elhenawy, H. A. Rakha, Y. Bichiou, M. Masmoud, S. Glaser, J. Pinnow, and A. Stohy, “A feasible solution for rebalancing large-scale bike sharing systems,” *Sustainability*, vol. 13, no. 23, p. 13433, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su132313433>
- [5] IEA, *Global EV Outlook 2020*. IEA. Paris, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3gne4EW>
- [6] M. M. Sokolowski, “Laws and policies on electric scooters in the european union: A ride to the micromobility directive?” *European Energy and Environmental Law Review*, vol. 29, pp. 127–140, 2020, place: Alphen aan den Rijn, The Netherlands Publisher: Kluwer Law International. [Online]. Available: <https://doi.org/10.54648/EELR2020036>
- [7] K. Turoń and P. Czech, “The concept of rules and recommendations for riding shared and private e-scooters in the road network in the light of global problems,” in *Modern Traffic Engineering in the System Approach to the Development of Traffic Networks*, E. Macioszek and G. Sierpiński, Eds. Springer International Publishing, 2020, pp. 275–284. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-34069-8_21
- [8] A. Li, P. Zhao, X. Liu, A. Mansourian, K. W. Axhausen, and X. Qu, “Comprehensive comparison of e-scooter sharing mobility: Evidence from 30 european cities,” *2022*, vol. 105, p. 103229, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103229>
- [9] K. Wang, X. Qian, D. T. Fitch, Y. Lee, J. Malik, and G. Circella, “What travel modes do shared e-scooters displace? a review of recent research findings,” *Transport Reviews*, pp. 1–27, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01441647.2021.2015639>
- [10] E. Ayyildiz, “A novel pythagorean fuzzy multi-criteria decision-making methodology for e-scooter charging station location-selection,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 111, p. 103459, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103459>
- [11] M.-D. Lin, P.-Y. Liu, J.-H. Kuo, and Y.-H. Lin, “A multiobjective stochastic location-allocation model for scooter battery swapping stations,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102079, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102079>
- [12] Y.-W. Chen, C.-Y. Cheng, S.-F. Li, and C.-H. Yu, “Location optimization for multiple types of charging stations for electric scooters,” *Applied Soft Computing*, vol. 67, pp. 519–528, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.02.038>
- [13] J. G. Schmidt, F. J. De Faveri, J. C. De Bona, E. A. Rosa, L. S. Dos Santos, C. Q. Pica, L. B. R. Morinico, and I. França, “Forecasts and impact on the electrical grid with the expansion of electric vehicles in northeast of brazil,” in *2022 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2022, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TD43745.2022.9816978>
- [14] L. Di Chiara, F. Ferres, and F. Bastarrica, “Impact of electromobility deployment scenarios in the power system of uruguay by 2028,” in *2021 IEEE URUCON*, 2021, pp. 360–363. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/URUCON53396.2021.9647426>
- [15] D. P. Jaramillo, M. C. Gutiérrez, and R. Mix, *Electromovilidad: Panorama actual en América Latina y el Caribe: Versión infográfica*. Banco Interamericano de Desarrollo, 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.18235/0001654>
- [16] Primicias. (2020) Las ventas de vehículos híbridos y eléctricos crecen casi 300 %. [Online]. Available: <https://bit.ly/3EM9mZR>
- [17] J. Figura and T. Gadek-Hawlena, “The Impact of the COVID-19 Pandemic on the Development of Electromobility in Poland. The Perspective of Companies in the Transport-Shipping-Logistics Sector: A Case Study,” *Energies*, vol. 15, no. 4, pp. 1–18, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3XkWfaj>
- [18] T. Rokicki, P. Bórawski, A. Beldycka-Bórawska, A. Zak, and G. Koszela, “Development

- of electromobility in european union countries under covid-19 conditions,” *Energies*, vol. 15, no. 1, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en15010009>
- [19] GAD Cuenca. (2022) Plan de movilidad. [Online]. Available: <https://bit.ly/3EPQlqh>
- [20] P. Ochoa, *Ciclovía de los Ríos de Cuenca*. GAD Municipal de Cuenca, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ETFQCw>
- [21] C. A. Cruz Leal and M. Virviescas Arias, “Evaluación de la operación del tranvía de Cuenca Ecuador y del tranvía de Medellín Colombia,” 2018.
- [22] Redacción El Mercurio. (2021) Nueva electrolinera en Cuenca. [Online]. Available: <https://bit.ly/3vnx7CY>
- [23] J. L. Espinoza, L. G. González, and R. Sempétegui, “Micro grid laboratory as a tool for research on non-conventional energy sources in ecuador,” in *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2017, pp. 1–7. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2017.8261615>
- [24] J. M. Rey, G. A. Vera, P. Acevedo-Rueda, J. Solano, M. A. Mantilla, J. Llanos, and D. Sáez, “A review of microgrids in latin america: Laboratories and test systems,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 6, pp. 1000–1011, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TLA.2022.9757743>
- [25] AMPERE ENERGY, *AMPERE square PRO Manual del instalador*. AMPERE POWER ENERGY S.L., 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ABgxm4>
- [26] ARCERNNR, *Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica*. Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3tRydGr>
- [27] DIN, *DIN 41772 Static power converters; semiconductor rectifier equipment, shapes and letter symbols of characteristic curves*. German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung), 1979. [Online]. Available: <https://bit.ly/3GCFD8b>
- [28] —, *DIN 41772 Supplement 1 Static power converters; semiconductor rectifier equipment, examples of characteristic curves for battery chargers*. German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung). [Online]. Available: <https://bit.ly/3GCJTEp>
- [29] —, *DIN 41773-1 Static power converters; semiconductor rectifier equipment with IU-characteristics for charging of lead-acid batteries, guidelines*. German Institute for Standardisation (Deutsches Institut für Normung). [Online]. Available: <https://bit.ly/3hSi28X>
- [30] T. McCarran and N. Carpenter, “Electric bikes: Survey and energy efficiency analysis,” *Efficiency Vermont*, 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ACmgYP>
- [31] Department of Energy. (2022) Fueleconomy.gov Top Ten. [Online]. Available: <https://bit.ly/3VdjKjy>