

serie

CIUDADES
SUSTENTABLES



LA CIUDAD SE MUEVE ASÍ

Estado del arte de la investigación en movilidad urbana en Cuenca

L L A
C T A

lab



CIUDADES
SUSTENTABLES

serie



CIUDADES
SUSTENTABLES



LA CIUDAD SE MUEVE ASÍ

Estado del arte de la investigación
sobre movilidad urbana en Cuenca

LA CIUDAD SE MUEVE ASÍ

*Estado del arte de la investigación
sobre movilidad urbana en Cuenca*

©Universidad de Cuenca

LlactaLAB-Ciudades sustentables

Autores:

Carla Hermida, Manuela Cordero, Adriana Quezada, Daniel Orellana, Enrique Flores-Juca, Jessica Chica, Estefanía Mora-Arias, María Elisa Bustos, Mateo Marín, Natasha Cabrera, Augusta Hermida, Patricia Cazorla, Elina Ávila-Ordóñez, Jairo Ortega, János Tóth, Tamás Péter, Martín Ortega, Lisseth Molina, Paúl Arévalo, Antonio Cano, Vinicio Iñiguez-Morán, Danny Ochoa-Correa, Juan Leonardo Espinoza, Francisco Jurado, Néstor Rivera, Juan Molina, Andrea Bermeo, Gina Novillo, Xavier Serrano-Guerrero, Antonio Barragán-Escandón, Esteban Zalamea-León, Gustavo Álvarez-Coello, Andrés Baquero-Larriva, Mateo Coello-Salcedo, Daniel Cordero-Moreno, Efrén Fernández-Palomeque, Robert Rockwood-Iglesias, Francisco Torres-Moscoso, Diego Morales Jadán, Marco Toledo Orozco, Javier Cabrera Mejía

Compilador:

Daniel Orellana

Diagramación y portada:

Galo Carrión

Maria Augusta Hermida

Rectora de la Universidad de Cuenca

Centro Editorial UCuenca Press

Dirección: Daniel López Zamora. Coordinación editorial: Ángeles Martínez Donoso. Corrección de estilo: Verónica Andrade Aguilar

Ciudadela Universitaria
Doce de abril y Agustín Cueva
(+593 7)405 1000
Casilla postal 01.01.168
editorial.ucuenca.edu.ec

Este libro fue arbitrado con pares externos bajo el sistema doble ciego.

Primera edición

Tiraje: 200 ejemplares

Derechos de autor: CUE-00529

ISBN: 978-9978-14-536-4

ISBN digital: 978-9978-14-546-3

Impreso en Cuenca, Ecuador
Junio, 2024

Agradecimiento

Quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad de Cuenca y sus autoridades: rectora, María Augusta Hermida, vicerrectora, Monserrath Jerves y vicerrector académico, Juan Leonardo Espinoza por darme la oportunidad de desarrollar mi carrera académica durante la última década. Este libro fue elaborado como parte del periodo sabático otorgado por la Universidad. Estoy también enormemente agradecimiento con la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, que me acogió en los primeros años de vinculación a la Universidad y a donde he regresado desde el 2022.

Esta obra representa también el desarrollo de diez años de investigación sobre movilidad sostenible en Cuenca dentro del grupo de investigación LlactaLAB – Ciudades Sustentables, parte del Departamento Interdisciplinario de Espacio y Población de la Universidad de Cuenca. LlactaLAB ha sido fundamental en mi desarrollo como científico y como persona; por esto extendo mi profunda admiración a las maravillosas personas que lo conforman, en particular a quienes han colaborado con diferentes capítulos: Lisseth Molina, Adriana Quezada, María Elisa Bustos y Augusta Hermida. En este contexto, un reconocimiento especial a Galo Carrión quién ha sido clave en la concepción, desarrollo, diseño y producción del libro.

Finalmente, un agradecimiento a todos los investigadores e investigadoras que han colaborado como autores en esta obra colectiva, quienes han hecho un enorme esfuerzo de síntesis para poner su conocimiento y experiencia a disposición del público.

Daniel Orellana Vintimilla

INTRODUCCIÓN

La movilidad es uno de los procesos urbanos más complejos e interesantes, pues representa la huella de las interacciones de las personas con el entorno urbano (Orellana, 2011). Al estudiar la movilidad estamos también comprendiendo otros aspectos de la ciudad con los que está íntimamente relacionada, como el espacio público, los sistemas urbanos, la equidad social, la energía, la capacidad institucional, los aspectos ambientales y la salud de la población. La movilidad urbana es, pues, uno de los indicadores más importantes de la calidad de vida de una ciudad, lo que puede ser resumido en la frase “dime cómo te mueves y te diré que tipo de ciudad eres”.

El caso de Cuenca (Ecuador) es visto frecuentemente con interés por parte de tomadores de decisión, planificadores urbanos, investigadores, políticos y personas interesadas en temas urbanos. Su condición de ciudad intermedia, con una calidad de vida relativamente alta, servicios básicos de calidad, espacios públicos bien mantenidos y sistemas urbanos funcionales, la han llevado a ser considerada un caso atípico en el contexto de las ciudades latinoamericanas, y la movilidad es uno de los aspectos focales de ese interés.

vii

Breve historia de la movilidad en Cuenca

Desde inicios del siglo XXI, el fenómeno de la movilidad en Cuenca ha sufrido transformaciones importantes. En el 2000, la ciudad tenía una población de aproximadamente 276 mil habitantes en un área urbana de 6 395 hectáreas (Hermida et al., 2015). Para ese año se estima que circulaban alrededor de 35 mil vehículos

motorizados en la ciudad, lo que representaba una tasa de motorización de 12 vehículos por cada 100 habitantes. La limitada extensión de la mancha urbana y la densidad relativamente alta ofrecía las condiciones óptimas de una ciudad de cercanías, en la que una gran parte de la población podía movilizarse diariamente de manera fácil, cómoda y rápida, tanto a pie como en transporte motorizado o incluso en bicicleta. Sin embargo, el deficiente sistema de transporte público, compuesto en ese entonces por 664 buses, la mayoría de ellos antiguos y en malas condiciones y sin una planificación adecuada, y la creciente preocupación por los efectos de la contaminación en una ciudad recientemente declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad habían empujado a la ciudad a dar pasos para reorganizar el sistema de transporte. Hermida (2018) presenta un detallado análisis de la historia de la movilidad en Cuenca entre 1999 y 2014 e identifica algunos hitos importantes. Basados en dicho estudio, y con algunos datos adicionales, a continuación, repasamos brevemente algunos de los aspectos más importantes de la movilidad en la ciudad en las dos últimas décadas.

En 1999 el gobierno local asumió las competencias de tránsito y transporte y expidió la primera ordenanza de planificación del transporte (Ordenanza de Planificación, Organización y Regulación del Tránsito y Transporte Terrestres en el cantón Cuenca, 1999). También se realizó el primer estudio técnico denominado “Plan para un sistema de tráfico sustentable para una ciudad piloto, Cuenca-Ecuador. Cuenca” (PADECO, 1999), centrado principalmente en el transporte público colectivo.

A pesar de que ese plan no fue implementado en su totalidad, permitió dar avances clave, que incluyeron la reorganización de las rutas de transporte público y la conformación de la Cámara de Transporte de Cuenca en el 2000. También se implementó de manera obligatoria la revisión técnica vehicular para el transporte público, que en los siguientes años se extendió a los demás vehículos motorizados. En cuanto a la infraestructura, se inició la construcción de carriles exclusivos para buses en el Centro Histórico, no sin resistencia por parte de varios sectores; así mismo, se implementó el sistema de estacionamiento rotativo tarifado en varias de estas zonas, pero el fuerte rechazo al

modelo inicial basado en inmovilizar los vehículos infractores, obligó a retirarlo y reemplazarlo, más adelante, con un sistema de aviso mediante un adhesivo en la ventana del vehículo. En 2001 se inició la construcción de la primera ciclovía, enfocada en actividades recreativas y poca conexión con las necesidades de movilidad.

Para el 2004, se mostraban los primeros resultados de la nueva institucionalidad. Por ejemplo, se realizó la renovación y optimización de la flota de autobuses, que se logró reducir a 475 luego de rediseñar las rutas.

Alrededor de 2005 surge un tema polémico que se des-
vía de la tendencia hacia una movilidad sostenible: la propuesta de construir una nueva autopista perimetral en la zona norte de la ciudad, afectando casi 10 mil hectáreas de suelo principalmente rural. Este proyecto, que cobró un gran impulso hacia 2009, se contradecía con los esfuerzos del mismo gobierno local de controlar el crecimiento del parque automotor, fortalecer el transporte público e intentar mantener la compacidad de la ciudad. De hecho, tal proyecto se contradecía directamente con varios elementos del Plan de Ordenamiento Territorial de 2009. La propuesta fue fuertemente criticada por varios sectores, incluyendo expertos en planificación urbana, técnicos municipales, académicos y actores políticos.

Probablemente uno de los aspectos más importantes entre 2005 y 2010 fue el inicio de un acelerado proceso de dispersión urbana, en el que la densidad poblacional de la ciudad disminuyó debido a la creciente construcción de condominios en áreas periurbanas y rurales. Esta dispersión tuvo efectos nefastos que cambiaron radicalmente la trayectoria de desarrollo de la ciudad. Los promotores inmobiliarios podían construir condominios cerrados sin entregar un porcentaje para espacio público. Además, estos condominios estaban en zonas alejadas, con poca conectividad y bajo servicio de transporte público, lo que generó una mayor dependencia del automóvil particular.

En 2009, se implementó el sistema integrado de recaudo para todo el transporte público urbano, lo cual fue un paso fundamental, ya que eliminó la competencia por pasajes entre diferentes cooperativas. Cuenca fue también la primera ciudad

en el país en implementar la tarjeta electrónica como modo de pago en el transporte público. Además, en este año se elaboró el primer plan de ciclovías urbanas, aunque su implementación no avanzó. El 2009 también fue importante en términos de institucionalización, pues se creó la Secretaría de Movilidad, y el año siguiente se constituyó la Empresa Municipal de Movilidad EMOV.

En el 2011 se iniciaron los estudios de prefactibilidad del Tranvía de Cuenca, marcando un hito importantísimo en la movilidad de la ciudad, aunque este medio de transporte tardaría una década en entrar en funcionamiento, luego de un tortuoso proceso con enormes dificultades durante la contratación, construcción y puesta en marcha.

Para el 2012 se contrató el “Plan de Ciclovías Urbanas y Proyecto Definitivo para Fase Piloto y del Estudio para el Sistema de Transporte Público en Bicicleta de la Ciudad de Cuenca” (MOVEIRE y EMOV EP, 2013). En ese año se estimaba que apenas el 1 % de la población utilizaba la bicicleta como medio de transporte. Sin embargo, es importante mencionar que ningún estudio ha incluido la movilidad de niños y adolescentes en las estimaciones, a pesar de que ellos son usuarios frecuentes de la bicicleta. En 2013 se inauguraron los terminales de transferencia que permitían conectar el transporte público urbano con el microregional y el nacional. Para el 2014, la implementación de ciclovías estaba completamente estancada, la mayoría de las existentes presentaban un diseño inadecuado, falta de conectividad y ubicaciones que no correspondían a las necesidades de planificación.

En el 2015 se elaboró el Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca. Este plan representa un giro radical de la planificación con una visión más integral que ya desde su título reconoce la importancia del abordaje conjunto de la movilidad y los espacios públicos. Aunque la implementación de este instrumento ha sido bastante limitada, durante los últimos años se han dado algunos avances importantes. Es así que entre 2016 y 2023 se construyeron nuevas ciclovías, continuando con el plan original de MOVEIRE e incluyendo procesos de planificación participativa (Orellana y Quezada, 2018), hasta completar

un total de aproximadamente 70 km en el 2023. En el 2019 se construyó el Sistema de Transporte en Bicicleta Pública de Cuenca, con un total de 20 estaciones, a través de una alianza público-privada.

Finalmente, en el 2021 inició la operación comercial del Tranvía de Cuenca, luego de varios años de inconvenientes. A pesar de que el proyecto fue planificado como parte integral del sistema de transporte público, hasta el 2023 no se ha iniciado siquiera el proceso de integración operativa ni tarifaria con los demás sistemas.

Este breve repaso histórico da cuenta de los avances que ha tenido Cuenca en materia de movilidad. Sin embargo, y a pesar de ellos, el crecimiento del parque automotor no solo que ha continuado, sino que se ha acelerado. La falta de políticas públicas certeras e integradas para la aplicación de los planes existentes, la desarticulación entre la planificación urbana y la planificación de la movilidad, la fragmentación en la implementación de los proyectos clave, la descoordinación institucional y la descontrolada dispersión urbana han disminuido la calidad del sistema de movilidad de la ciudad. Es así como, según los datos actuales de población y matriculación vehicular, la tasa de motorización estaría en cerca de 38 vehículos por cada 100 habitantes, es decir que se ha triplicado en los últimos 25 años. Los impactos de este aumento son enormes en la población y el medio ambiente, lo cual representa, junto con la inseguridad, uno de los mayores deterioros de la calidad de vida en la ciudad.

xi

La investigación de la movilidad en Cuenca

Cuenca goza de una escena académica particularmente dinámica y productiva en aspectos relacionados a la movilidad. Entre 2015 y 2022, se han publicado 73 artículos científicos en revistas indexadas en SCOPUS y SCIELO, que tratan sobre movilidad en esta ciudad. Esto es un excelente indicador del interés académico en estos aspectos, y el alcance internacional de la investigación local. Además, existe un importante número de artículos

publicados en revistas indexadas en otras bases de datos regionales, libros, reportes técnicos, trabajos académicos, proyectos de fin de carrera y tesis de postgrado. Esta producción científica subraya el inmenso potencial que Cuenca tiene para desarrollar una movilidad sostenible basada en evidencia.

Sin embargo, y a pesar de la rica producción científica, existe una desconexión entre la investigación generada y el acceso a esta por parte de tomadores de decisiones, planificadores, estudiantes e incluso otros investigadores. De los 73 artículos científicos sobre movilidad en Cuenca, apenas un tercio son de acceso abierto, mientras que la mayoría requiere suscripción a costosas bases académicas especializadas para su consulta. Incluso más preocupante es que algunos de estos trabajos se publican en editoriales a las cuales ni siquiera las universidades locales están suscritas. Adicionalmente, el idioma puede representar un obstáculo, pues 9 de cada 10 artículos están publicados en inglés. Este escenario plantea un serio desafío para universidades y grupos de investigación: se está generando conocimiento valioso para la ciudad, pero con acceso extremadamente limitado.

Objetivos y organización del libro

Esta obra colectiva tiene como objetivo sistematizar, divulgar y mejorar la visibilidad de la investigación académica en movilidad urbana en Cuenca.

El libro se compone de 13 capítulos, organizados en 3 secciones que exploran una amplia gama de temas. La primera sección “Usuarios” incluye investigaciones que exploran la relación de las personas con la movilidad, incluyendo grupos de interés como la niñez, la población en zonas periurbanas, los aspectos de género y las personas con discapacidad. La segunda sección, denominada “Sistemas”, presenta investigaciones relacionadas con los diferentes sistemas de movilidad de la ciudad: el transporte público en bus, el sistema de bicicleta pública, el tranvía, los sistemas de *Park and Ride* (estacionamientos aso-

ciados al transporte público), y algunos aspectos de la movilidad motorizada. Finalmente, la tercera sección, llamada “Electromovilidad” recopila investigaciones en este campo que genera creciente interés como una estrategia para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Este libro es el resultado de un esfuerzo colaborativo sin precedentes que involucra a 45 investigadores de 12 grupos y departamentos de seis universidades diferentes: la Universidad de Cuenca, Universidad Politécnica Salesiana, Universidad del Azuay, Universidad Católica de Cuenca, Universidad de Jaén y Budapest University of Technology and Economics. Cabe destacar que todos los autores invitados aceptaron participar y se esforzaron por condensar su investigación en capítulos breves redactados en español y en un lenguaje accesible para un público más amplio.

Aunque la obra es colectiva, cada capítulo fue desarrollado de manera individual o en grupos pequeños por sus respectivos autores. Esto no solo enriquece la diversidad temática del libro, sino que también permite la inclusión de perspectivas múltiples, e incluso en algunos casos contradictorias, sobre ciertos temas. Por lo tanto, la autoría, atribución y responsabilidad de cada capítulo recaen directamente en sus autores.

Es crucial señalar que, aunque este libro ofrece una visión panorámica de la reciente investigación en movilidad, incluye solamente una pequeña parte del conocimiento producido por la academia. En el listado de referencias al final de este apartado se podrá encontrar más publicaciones realizadas por el autor en colaboración con otros investigadores referentes a la movilidad en Cuenca.

Aun así, todavía hay muchos temas pendientes de exploración. La ciencia es un campo en constante evolución, pero confiamos en que la inercia ya generada y el alto nivel de colaboración entre los investigadores de Cuenca serán cruciales para abordar los futuros desafíos de la movilidad. Esta colaboración promete facilitar la generación de un conocimiento científico que sea no solo riguroso, sino también útil, oportuno y accesible.

Referencias y bibliografía complementaria

Abad, L., y Orellana, D. (2018). Análisis exploratorio de comportamientos de ciclistas voluntarios mediante minería de patrones espacio-temporales en Cuenca, Ecuador. *Maskana*, 9(1), 141–151. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.01.13>

Armas, R., Aguirre, H., y Orellana, D. (2022). Evolutionary bi-objective optimization for the electric vehicle charging stand infrastructure problem. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 1139–1146. <https://doi.org/10.1145/3512290.3528859>

Cardoso, M., Orellana, D., y Hermida, M. A. (2021). Tactical urbanism: collective interventions in urban public spaces. En *Sustainable Urban Development* (pp. 6–1 to 6–22). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-3971-1ch6>

Guerrero, M., Orellana, D., Andrade, J., y Naranjo, G. (2020). Relation between Proximity to Public Open Spaces and Socio-economic Level in Three Cities in the Ecuadorian Andes. *6th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, 81–91. <https://www.scitepress.org/Link.aspx?doi=10.5220%2f0009396600810091>

Guirao, B., y Orellana, D. (2021). New trends in urban mobility. En *Sustainable Urban Development* (pp. 4–1 to 4–17). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-3971-1ch4>

Hermida, C. (2018). *La ciudad no se mueve sola*. Casa Editora Universidad del Azuay. <https://doi.org/10.33324/ceu-azuay.23>

Hermida, C., Cordero, M., y Orellana, D. (2019). Analysis of the influence of urban built environment on pedestrian flow in an intermediate-sized city in the Andes of Ecuador. *Interna-*

tional Journal of Sustainable Transportation, 13(10), 777–787.
<https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1514445>

Hermida, M. A., Hermida, C., Cabrera, N., y Calle, C. (2015). La densidad urbana como variable de análisis de la ciudad: El caso de Cuenca, Ecuador. EURE. *Revista latinoamericana de estudios urbano regionales*, 41(124), 25–44. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612015000400002>

Martínez, I., Pulla, P., Tapia, D., y Orellana, D. (2016). Análisis del área de influencia de infraestructura de ciclismo urbano usando un enfoque de energía. En G. Olmedo (Ed.), *Congreso REDU 2016* (pp. 9–10). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

MOVERE y EMOV EP. (2013). *Estudio para la elaboración del plan de ciclovías urbanas y proyecto definitivo para la fase piloto y del estudio para el sistema de transporte público en bicicleta de la ciudad de Cuenca*.

Municipalidad de Cuenca. (1999). Ordenanza De Planificación, Organización y Regulación del Tránsito y Transporte Terrestres en el Cantón Cuenca, 90, Concejo Cantonal De Cuenca. <https://www.cuenca.gob.ec/node/8795>

Municipalidad de Cuenca. (2015). *Plan de movilidad y espacios públicos. Tomo I*, 540.

Orellana, D. (2011). Dime cómo te mueves y te diré quién eres: La movilidad como huella del comportamiento espacial de las personas. En J. R. Vaquero (Ed.), *Movilidad, retos y oportunidades para los profesionales de la Información y Comunicación* (pp. 32–45). Fundación Ciencias de la de Documentación. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5191.6645>

Orellana, D. (2016). Métodos para el análisis de patrones de movilidad no motorizada. En B. L. E. de Alvarez Cristina (Ed.), *Comunidades Urbanas Energeticamente Eficientes* (pp. 140–

148). http://repositorio.ufes.br/jspui/bitstream/10/6802/1/Version%20digital_comunidades%20urbanas%20energeticamente%20eficientes.pdf#page=140

Orellana, D., Bustos, M. E., Marín-Palacios, M., Cabrera-Jara, N., y Hermida, M. A. (2020). Walk'n'roll: Mapping street-level accessibility for different mobility conditions in Cuenca, Ecuador. *Journal of Transport and Health*, 16, 100821. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100821>

Orellana, D., y Guerrero, M. L. (2019). Exploring the influence of road network structure on the spatial behaviour of cyclists using crowdsourced data. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(7), 1314–1330. <https://doi.org/10.1177/2399808319863810>

Orellana, D., Neira, M., Guerrero, M. L., Samaniego, P., y Hermida, M. A. (2016). New geotools for urban studies. En C. Engel, E. Nico-Rodrigues, L. Bragança, y R. Mateus (Eds.), *SBE16 Brazil & Portugal Sustainable Urban Communities towards a Nearly Zero Impact Built Environment* (pp. 857–866). http://sbe16.civil.uminho.pt/app/wp-content/uploads/2016/09/SBE16-Brazil-Portugal-Vol_2-Pag_857.pdf

Orellana, D., y Quezada, A. (2018). *Mapeo móvil participativo para la planificación de ciclovías urbanas*. PUCE. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30580>

Orellana, D., Quezada, A., Andino, A., y Peralta, C. (2019). *eMAPS.ec: Herramienta para Evaluación a Microescala de Ambientes Peatonales (Adaptación a ciudades ecuatorianas)* (Versión 1). Universidad de Cuenca. https://github.com/llactalab/eMaps_Score_QGIS_Plugin

Orellana, D., Quezada, A., Andrade, S., y Ochoa-Avilés, A. (2017). Metodología para definición de conglomerados de muestreo espacial en el entorno urbano basados en caminabilidad y factores socioeconómicos. *Proceedings of V Congreso REDU*, 487–491.

PADECO. (1999). *Plan para un sistema de tráfico sustentable para una ciudad piloto, Cuenca-Ecuador*.

Quezada, A., y Orellana, D. (2017). Detección de patrones secuenciales generalizados de movilidad de ciclistas a partir de datos crowdsourcing. *Memorias Universidad del Azuay*, 367–373. <http://revistas.uazuay.edu.ec/index.php/memorias/article/view/83>

Quinde, C., Guillermo, D., Siguenza-Guzman, L., Orellana, D., y Pesántez-Cabrera, P. (2020). A Software Architecture Proposal for a Data Platform on Active Mobility and Urban Environment. *Information and Communication Technologies*, 501–515. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62833-8_37

Prólogo

Acertadamente, Daniel Orellana, amigo y compilador de este libro sugiere que una ciudad se caracteriza por la forma cómo se mueve. Sin duda alguna, sus desplazamientos describen cómo esta ha sido pensada y producida y, asimismo, qué la privilegia con relación a las interacciones económicas, sociales y ecológicas. Precisamente, en las relaciones que la movilidad genera radica su complejidad y el interés de su análisis.

El caso de estudio es Cuenca, una ciudad intermedia, Patrimonio Cultural del Ecuador y de la Humanidad, catalogada por muchos como un buen lugar para vivir en función de sus indicadores socioeconómicos y la calidad de sus servicios, sistemas y espacios públicos. No obstante, en el ámbito de la movilidad, si bien la Ciudad ha dado importantes avances en las últimas décadas, a través de planes y proyectos concretos de movilidad sostenible, es necesario analizar si la planificación, la institucionalidad y los proyectos que se han implementado alcanzan a tejer una estrategia sólida de sostenibilidad para el presente y el futuro de la Ciudad.

En ese sentido, este libro ofrece algunas lecciones para académicos, tomadores de decisiones del ámbito público y privado, y ciudadanos interesados en la movilidad. En un primer momento, el recorrido histórico sobre la movilidad de Cuenca pone de manifiesto una desarticulación entre los planes de la urbe y los planes y políticas de movilidad sostenible; de hecho, en la práctica, la tasa de motorización se ha triplicado en las tres últimas décadas lo que da cuenta de un crecimiento que pone en duda la sostenibilidad deseada.

Para quienes somos responsables de las instituciones académicas rescato algunos puntos que deben llamar nuestra

atención. El primero, establecer estrategias para eliminar la evidente distancia que existe entre la investigación de alta calidad que producimos en las universidades y las instituciones gubernamentales que planifican y deciden sobre la movilidad de la Ciudad; estas investigaciones muchas veces se producen con recursos públicos y no cumple la finalidad de incidir en los cambios sociales. El segundo, en las universidades, esta investigación no necesariamente alimenta los contenidos de la formación de nuestros estudiantes, lo que significa que nuestros programas estarían desaprovechando gran parte de la novedad que se produce en cada campo disciplinar. El tercero, es la falta de diálogo entre investigadores, grupos de investigación o dependencias académicas intra e interuniversitarias; debido a que la mayoría de los estudios se obtienen en bases de datos costosas o incluso a las que algunas universidades no están suscritas, lo cual elitiza la investigación relevante realizada en nuestros contextos.

En relación con la movilidad de Cuenca, extraigo algunas reflexiones de las conclusiones en esta obra. En la dimensión social, niñas, niños, adultos mayores y personas con discapacidad continúan en alto riesgo en el espacio y el transporte público sin que se avizoren políticas locales de prevención de la inseguridad o cambios radicales en las dinámicas de movilidad y acceso al espacio público que reviertan esta problemática persistente. En la dimensión económica, las inversiones públicas continúan promoviendo el mercado de la movilidad motorizada; y, las inversiones en movilidad y transporte público de los últimos años estarían generando plusvalías que podrían recuperarse para invertir en movilidad sostenible. En la dimensión ecológica, las investigaciones expresan persuasivamente la necesidad de la transición hacia la electromovilidad y el transporte público eléctrico; la posibilidad de avanzar hacia la energía solar fotovoltaica de uso doméstico cuyos excedentes alimenten la red pública y los sistemas de movilidad sostenible; también, nos presentan alternativas tecnológicas para hacer más eficiente los sistemas tranviarios como el nuestro, la exploración de sistemas de reducción de la congestión vehicular aplicables a nuestros contextos y estrategias de descarbonización del transporte público.

A título personal, considero que el discurso de la sostenibilidad es fácilmente utilizable, maleable y banalizable en la política y en la sociedad; de manera que investigaciones rigurosas como las que producimos contribuyen a disputar las nociones de sostenibilidad de forma crítica y propositiva. En las ciudades se producen y reproducen las fuerzas del modelo económico dominante y sus lógicas presionan sobre la planeación y el crecimiento que separan cada vez más las ciudades de la naturaleza, en consecuencia, nos alejamos de la sostenibilidad. La movilidad sostenible tiene el potencial para reconectar a la gente con la gente y a la gente con la naturaleza.

Para finalizar, quiero elogiar el esfuerzo y trabajo de altísima calidad de 45 investigadores de las cuatro universidades de Cuenca y dos universidades extranjeras. Igualmente, no puedo dejar de resaltar que esta obra proviene de una serie de producciones científicas sobre la Ciudad dentro del grupo de investigación LlactaLAB – Ciudades Sustentables, parte del Departamento Interdisciplinario de Espacio y Población de la Universidad de Cuenca, al que orgullosamente pertenezco.

Contenido

Algunos desafíos actuales en la movilidad: género, entorno urbano y gestión del suelo	1
Carla Hermida	
Manuela Cordero	
Movilidad segura a la escuela: barreras y principales hallazgos	11
Adriana Quezada	
Daniel Orellana	
La movilidad en la periferia y su dependencia con la ciudad de Cuenca	27
Enrique Flores-Juca	
Jessica Chica	
Estefanía Mora-Arias	
La accesibilidad frente a distintas condiciones de movilidad	39
María Elisa Bustos	
Daniel Orellana	
Mateo Marín	
Natasha Cabrera	
Augusta Hermida	
Transporte público en Cuenca: línea base y oportunidades de mejora	49
Patricia Cazorla	
Elina Ávila-Ordóñez	
El sistema de <i>park and ride</i> en el entorno urbano de una ciudad media	67
Jairo Ortega	
János Tóth	
Tamás Péter	
Martín Ortega	

Sistema de transporte Bici Pública Cuenca: desafíos y oportunidades	81
Lisbeth Molina	
Adriana Quezada	
Daniel Orellana	
Control energético tranviario usando hidrógeno y supercapacitores	93
Paúl Arévalo	
Antonio Cano	
Francisco Jurado	
Características y efectos de la movilidad motorizada en la ciudad de Cuenca	111
Néstor Rivera	
Juan Molina	
Andrea Bermeo	
Gina Novillo	
Transporte, energía y transición a la electromovilidad	125
Xavier Serrano-Guerrero	
Antonio Barragán-Escandón	
Esteban Zalamea-León	
Descarbonización del transporte en Cuenca	141
Gustavo Álvarez-Coello	
Andrés Baquero-Larriva	
Mateo Coello-Salcedo	
Daniel Cordero-Moreno	
Efrén Fernández-Palomeque	
Robert Rockwood-Iglesias	
Francisco Torres-Moscoso	

**Implementación masiva de medios de
electromovilidad en entornos urbanos y su
impacto en la red eléctrica**

Vinicio Iñiguez-Morán
Danny Ochoa-Correa
Juan Leonardo Espinoza

155

**La transición a la electromovilidad: una
perspectiva técnico-eléctrica**

Diego Morales Jadán
Marco Toledo Orozco
Javier Cabrera Mejía

173

Control energético tranviario mediante el uso de hidrógeno y supercapacitores

Paul Arévalo^{1,2}  0000-0002-6721-1326

Antonio Cano¹  0000-0002-6440-021X

Francisco Jurado¹  0000-0001-8122-7415

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Jaén, 23700
EPS Linares, Jaén, España.

² Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Telecomunicaciones,
Universidad de Cuenca, Cuenca, 010107, Ecuador.

Puntos clave

- El tranvía de Cuenca podría ser alimentado con sistemas basados en energías renovables, hidrógeno y sistemas de almacenamiento energético.
- Según simulaciones con datos reales, estos sistemas serían factibles en términos energéticos y económicos.
- Uno de los modelos propuestos permitiría que el tranvía funcione sin una estructura de catenarias y sea completamente autónomo.
- La propuesta ha logrado reducir los costes energéticos radicalmente con respecto a la actualidad.

3

Introducción

La creciente adopción de fuentes de energía renovable, debido al agotamiento de los combustibles fósiles a nivel global, ha impulsado el desarrollo de diversas técnicas de gestión energética. Estas técnicas se están utilizando tanto para abastecer las cargas conectadas a la red como para respaldar el transporte público sostenible, incluyendo los tranvías eléctricos (Arévalo et

al., 2020) . Sin embargo, el suministro energético de un tranvía difiere del de una carga eléctrica habitual debido a las fluctuaciones abruptas de potencia durante las aceleraciones y paradas de sus vagones.

Actualmente, el tranvía de Cuenca se alimenta a través de la red de suministro eléctrico de distribución, con subestaciones individuales colocadas a lo largo de su recorrido. La energía depende de la red eléctrica nacional y de sus fuentes primarias, que en el caso de Ecuador incluyen una combinación de centrales convencionales (diésel, bunker o carbón) y fuentes renovables (hidroeléctrica, solar o eólica) (Arévalo et al., 2021). Sin embargo, la dependencia de la red eléctrica nacional representa un desafío para el control y la reducción de las emisiones de carbono a nivel local. Por lo tanto, varios estudios proponen distintas fuentes de propulsión para el tranvía con el objetivo de reducir las emisiones de carbono. Por ejemplo, en la ciudad de Zaragoza, España, se han propuesto diversas técnicas de control energético para evaluar la factibilidad de un tranvía alimentado principalmente por celdas de hidrógeno, supercondensadores y baterías (García et al., 2012). De manera similar, en la ciudad de Sevilla, España, se han realizado estudios sobre un tranvía alimentado por celdas de combustible y baterías de níquel-metal hidruro, aprovechando la energía regenerativa del frenado del tranvía para recargarlas (García et al., 2013).

A lo largo de las últimas décadas, la investigación relacionada con el abastecimiento energético de tranvías ha mejorado significativamente. Por ejemplo, Li et al. (2019) han presentado un novedoso sistema de control basado en celdas de combustible y supercondensadores para un tranvía, minimizando el consumo de hidrógeno. La mayoría de los estudios existentes se centran en analizar la eficiencia energética, comparando diferentes fuentes energéticas para minimizar el consumo de hidrógeno y estabilizar el voltaje de la barra de corriente continua utilizando diferentes métodos de optimización.

Sin embargo, hasta la fecha, no se ha llevado a cabo un estudio detallado sobre la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables como fuente primaria de abastecimiento

para el sistema de tranvía. Por ejemplo, las estaciones de carga de hidrógeno instaladas a lo largo de la ruta del tranvía podrían utilizar energía de la red eléctrica para llevar a cabo el proceso de electrólisis, en el cual el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno utilizando electricidad. Además, sería conveniente considerar la implementación de una micro red eléctrica que integre fuentes renovables, como paneles solares o turbinas eólicas, para generar la electricidad necesaria para este proceso de electrólisis. También podrían explorarse tecnologías emergentes, como supercapacitores, baterías de ion de litio o celdas de combustible de hidrógeno, que actualmente están siendo escasamente estudiadas en este contexto. No obstante, para analizar estos sistemas se requiere un sistema de control que considere varios parámetros y variables, incluyendo la aleatoriedad de las fuentes renovables, el consumo de hidrógeno, la ubicación de los componentes, la gestión energética y el análisis de costes para la topografía andina de la ciudad de Cuenca.

Ante lo expuesto, en este capítulo se analizan alternativas de suministro energético para el tranvía de Cuenca, mediante dos posibles escenarios. El primero, denominado “Tranvía con fuentes renovables”, mantiene la estructura actual con catenarias, pero se alimenta de una mini red que aprovecha las potenciales principales fuentes renovables de la ciudad, incluyendo sistemas fotovoltaicos, recursos hidrocinéticos de los ríos locales y fuentes de biomasa provenientes de la industria del mueble, además de la red de suministro energético existente que servirá de apoyo. El segundo escenario, llamado “Tranvía autónomo” se enfoca en utilizar un solo punto de recarga al inicio del trayecto y almacenar la energía a bordo a través de varios sistemas.

Para ambos escenarios propuestos, se han llevado a cabo simulaciones con la herramienta Matlab-Simulink®, que utiliza datos auténticos de corrientes de arranque y parada del tranvía para que los resultados se asemejen a la realidad (Arévalo et al., 2020).

Descripción del tranvía actual y escenarios propuestos

El sistema tranviario de Cuenca en la actualidad sigue un diseño convencional en el que la alimentación eléctrica se realiza principalmente a través de catenarias y, en el Centro Histórico, mediante un sistema de alimentación desde el suelo. Se encuentra una descripción detallada de este tranvía en Arévalo et al. (2020).

A continuación, se explican los dos escenarios de alimentación eléctrica tranviaria propuestos en este capítulo.

Tranvía con fuentes renovables

Fuentes energéticas

En este escenario se propone utilizar una mini red con tres fuentes de energía renovables: un sistema de paneles solares, que aprovechan la elevada radiación solar en la ciudad; turbinas hidrocínéticas de eje horizontal, que aprovechan el potencial hídrico de los ríos de Cuenca para generar electricidad, y una planta de generación eléctrica, que utiliza residuos de biomasa, específicamente aserrín proveniente de varias fábricas de muebles en la ciudad, de los que se dispone de los datos necesarios.

Es importante destacar que la turbina hidrocínética no requiere la construcción de presas ni otros elementos de control. La turbina que se implementaría en el río Paute ha sido objeto de análisis debido a su condición, como la confluencia de varios ríos en él.

Se ha realizado una optimización de la capacidad de las fuentes energéticas de este escenario, basándose en la disponibilidad de recursos renovables durante un año mediante el uso del *software* especializado en optimizaciones de sistemas renovables híbridos HOMER pro (US National Renewable Energy Laboratory [NREL], s.f.).

El tranvía con fuentes renovables utilizará el mismo sistema estructural actual del tranvía de Cuenca, es decir, un es-

cenario incluyendo catenarias para llevar la electricidad desde la fuente de generación hasta el tranvía, y en caso de no existir suficiente recurso renovable, la energía para impulsarlo se tomará desde la red eléctrica de distribución principal, tal como se hace en la actualidad.

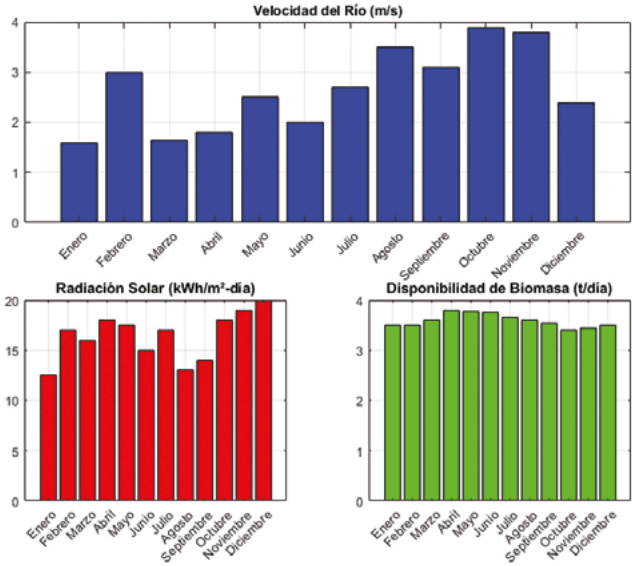


Figura 1. Recursos renovables. (a) Velocidad del Río Paute (m/s), (b) Radiación Solar Global en Cuenca - Ecuador (kWh/m^2), (c) Recurso de Biomasa (t/día). Fuente. Arévalo et al. (2020).

La disponibilidad de recursos renovables como la radiación solar, la biomasa y la velocidad del río, se explican en detalle en la Figura 1.

Sistema de almacenamiento energético

El tranvía estará equipado con un sistema de almacenamiento energético híbrido a bordo compuesto por supercapacito-

res y baterías de ion de litio. Se utilizan supercapacitores por su alta densidad de potencia para abastecer al tranvía durante sus arranques y recargar energía durante sus paradas. Asimismo, las baterías de ion-litio, por su bajo coste y alta densidad energética, resultan prometedoras para este tipo de aplicaciones. Esta combinación ayudará a impulsar al tranvía durante los arranques y pendientes, reduciendo el consumo energético de la red eléctrica convencional. Además, cuenta con una celda de combustible que genera electricidad a partir de hidrógeno, la misma que se abastecerá mediante tanques de hidrógeno instalados en ciertas paradas a lo largo del trayecto del tranvía.

Control energético

En esta sección se describe el funcionamiento del tranvía con fuentes renovables, cuyo objetivo principal es reducir la dependencia de la red eléctrica convencional, aumentar la autosostenibilidad y reducir los altos costos asociados con las facturas eléctricas. Cada componente debe cumplir funciones y restricciones específicas, como se explica a continuación:

- Cuando el supercondensador esté suministrando energía al tranvía, las fuentes renovables recargarán las baterías de iones de litio y los tanques de hidrógeno, ya que es crucial aprovechar al máximo la energía renovable disponible en cada momento.
- Si las baterías de ion de litio están alimentando al tranvía, las fuentes renovables deben recargar los supercapacitores y los tanques de hidrógeno.
- En caso de que las celdas de combustible de hidrógeno estén proporcionando energía al tranvía, las fuentes renovables deben recargar primero el supercondensador y luego las baterías de iones de litio, siguiendo un orden de prioridad.
- Si ningún sistema de almacenamiento energético está suministrando energía al tranvía, las fuentes renovables deben abastecerlo directamente y si todavía hay un exceso de electricidad, esta debe utilizarse para recargar los supercapacitores y las baterías respectivamente. Si aún queda exceso de energía, debe ser inyectado en la red eléctrica pública

- Por último, en caso de que no haya suficiente energía proveniente de las fuentes renovables, como en días nublados o periodos de sequía, el tranvía debe obtener energía de la red de distribución eléctrica convencional para garantizar un suministro continuo.

Tranvía autónomo

Fuentes energéticas

En este escenario, la única fuente de energía es la red eléctrica pública, pero se alimenta en un único punto al final del recorrido del tranvía evitando el uso de los sistemas de transmisión por catenarias o en el suelo. En este caso, no se emplean fuentes de generación de energía renovable.

Sistema de almacenamiento energético

En el punto de recarga, la energía se almacena en baterías de litio, supercondensadores y celdas de combustible de hidrógeno, eliminando la necesidad de un sistema estructural de catenarias. Los puntos de recarga de hidrógeno están distribuidos en algunas estaciones del tranvía, donde se utiliza para recargar los sistemas de almacenamiento energético a través de la celda de combustible de hidrógeno. Para evitar que el tranvía se descargue por completo, antes de llegar a la estación de recarga de hidrógeno, se emplea un sistema de frenado regenerativo que aprovecha la energía cinética acumulada durante las desaceleraciones para recargar los sistemas de almacenamiento energético. Finalmente, al final de su recorrido, los vagones utilizan la energía de la red para recargar nuevamente el sistema antes de iniciar un nuevo trayecto.

Control energético

En este escenario, el enfoque se centra en reducir la infraestructura existente utilizada para suministrar energía al tranvía, en

particular, el sistema de catenarias instalado en la avenida de las Américas y avenida España, además de disminuir significativamente la dependencia de la red eléctrica, de manera similar al caso anterior. Por lo tanto, el tranvía cuenta con un único punto de conexión con la red al final del viaje de ida y vuelta, donde se realiza la recarga de los sistemas de almacenamiento (supercapacitores, baterías y tanque de hidrógeno a bordo). En este caso, la red ya no suministra energía al tranvía a través de catenarias, como ocurría en el caso anterior. Sin embargo, para garantizar el funcionamiento continuo del tranvía, se utiliza el frenado regenerativo, aprovechando la energía cinética de cada vagón cuando estos frenan. A continuación, se detalla el funcionamiento del sistema de control en este escenario:

- Si el supercapacitor está suministrando energía al tranvía, la energía generada durante el frenado regenerativo se utiliza para recargar las baterías de ion de litio.
- Cuando las baterías de ion de litio están alimentando al tranvía, el frenado regenerativo se aprovecha para recargar los supercapacitores.
- En caso de que las celdas de combustible de hidrógeno estén abasteciendo al tranvía, la energía obtenida del frenado regenerativo se utiliza primero para recargar el supercapacitor y luego las baterías de ion de litio, siguiendo un orden de prioridad.
- Si ninguno de los sistemas de almacenamiento energético está proporcionando energía al tranvía, la red eléctrica pública recargará los tanques de hidrógeno, que deben estar ubicados en ciertas paradas del tranvía.

Cada uno de los dos escenarios propuestos para la propulsión alternativa del tranvía se ha analizado teniendo en cuenta datos reales de corriente durante el frenado y aceleración de cada vagón.

Los detalles de los modelos matemáticos de las fuentes renovables y el sistema de almacenamiento energético, así como la validación experimental de estos modelos, se encuentran exhaustivamente descritos en Arévalo et al. (2020). Es im-

portante destacar que este estudio ha logrado una alta precisión en las simulaciones, reflejando de manera precisa el comportamiento real de cada componente.

Resultados y discusión

Resultados energéticos

Para evaluar los resultados de los escenarios propuestos en este capítulo, se llevaron a cabo detalladas simulaciones computacionales en el *software* Matlab (MathWorks, s.f.) , donde se modeló el tranvía de Cuenca. A continuación, se presentan los resultados de cada componente con relación a los dos escenarios presentados.

En la Figura 2, se muestra la potencia generada por los supercapacitores. El tranvía con fuentes renovables se representa como “1” y el tranvía autónomo como “2”. En el eje horizontal, se representa el tiempo en segundos. Este intervalo es crucial, ya que el tranvía experimenta picos de potencia durante el arranque y la parada. Es evidente que el supercapacitor del tranvía con fuentes renovables puede cubrir picos de potencia más altos. En este caso, el supercapacitor se descarga hasta un

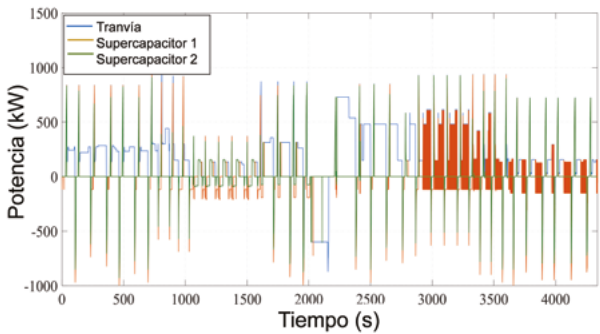


Figura 2. Resultados de las simulaciones, potencia eléctrica producida por el supercapacitor. Fuente. Arévalo et al. (2020).

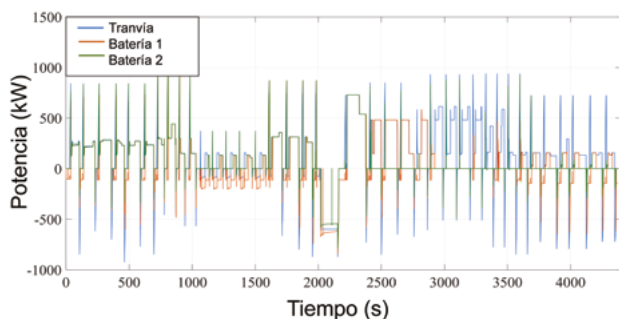


Figura 3. Resultados de las simulaciones, potencia eléctrica producida por las baterías. Fuente: Arévalo et al. (2020).

90,55 % para el tranvía con fuentes renovables y un 89,69 % para el tranvía autónomo, en promedio. El objetivo del control energético propuesto es mantener el supercapacitor con una alta carga para garantizar el suministro. Sin embargo, es importante destacar que el supercapacitor solo puede cubrir picos de potencia instantáneos. Para situaciones en las que el supercapacitor no es suficiente, se utilizan baterías de iones de litio, como se explica a continuación.

En la Figura 3, se muestra la potencia generada por las baterías en relación con la potencia eléctrica total consumida por el tranvía durante todo su recorrido. Nuevamente, se utiliza “batería 1” para el tranvía con fuentes renovables y “batería 2” para el tranvía autónomo. En este caso, las baterías suministran energía durante más tiempo en comparación con los supercapacitores. Es importante destacar que el tranvía con fuentes renovables es capaz de cubrir picos de potencia eléctrica más altos. La descarga promedio de las baterías es del 72,42 % para el tranvía con fuentes renovables y del 69,92 % para el tranvía autónomo.

A pesar de tener un sistema híbrido (supercapacitores y baterías) para impulsar el tranvía, existen tramos, como la subida de Milchichig, que presentan pendientes pronunciadas, así como múltiples paradas no planificadas a lo largo de todo

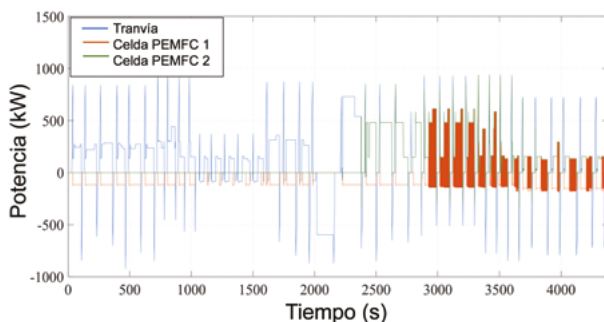


Figura 4. Resultados de las simulaciones, potencia eléctrica producida por las celdas de combustible de hidrógeno. Fuente. Arévalo et al. (2020).

el trayecto. Para garantizar la continuidad del servicio en todo momento, se incorpora un sistema de celdas de combustible de hidrógeno.

La Figura 4, muestra la potencia de salida de las celdas de combustible de hidrógeno. A diferencia de los dos componentes anteriores, las celdas solo producen la potencia que los supercapacitores y las baterías no pueden suministrar. “Celda 1” corresponde al tranvía con fuentes renovables, que tiene una mayor capacidad de suministro, y “Celda 2” corresponde al tranvía autónomo, que tiene una menor capacidad. En cuanto al nivel medio de carga del tanque de hidrógeno, es del 28,02 % para el tranvía con fuentes renovables y del 32,29 % para el tranvía autónomo. El consumo de hidrógeno aumenta cuando no se consideran fuentes renovables.

En resumen, los resultados indican que ambos escenarios pueden abastecer al tranvía durante todo su recorrido sin depender directamente de la red eléctrica principal. Sin embargo, el tranvía autónomo debe recargar sus componentes de almacenamiento energético desde la red eléctrica al final de su viaje. Con tecnología avanzada, la recarga de tranvías autónomos puede ser muy rápida gracias a sistemas de carga de alta

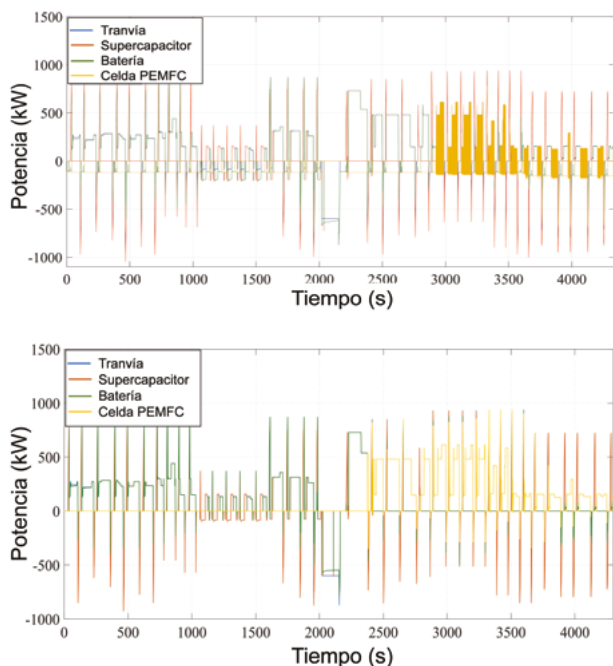


Figura 5. Resultados de las simulaciones, potencia eléctrica producida por el sistema de almacenamiento. (a) Tranvía con fuentes renovables y (b) Tranvía autónomo. Fuente. Arévalo et al. (2020).

potencia, carga por inducción, baterías diseñadas para cargas rápidas y sistemas avanzados de gestión de baterías. Algunas estaciones de carga pueden recargar los tranvías en minutos o incluso segundos, en paradas estratégicas; aunque la implementación de estas tecnologías puede ser costosa y requerir una infraestructura especializada. El resultado de este escenario energético para impulsar el tranvía de Cuenca durante todo su recorrido se muestra en la Figura 5.

Tabla 1. Principales costes de los elementos de abastecimiento energético para el tranvía de Cuenca.

Componente	Inversión US \$	Costo de reemplazo	Operación y mante- nimiento	Expec- tativa de vida
Turbina hi- drocinética	\$11 179	\$9 500	\$20 000	10 años
Paneles solares	\$62 000	\$45 000	\$12 400	25 años
Supercapa- citor	\$75 840	\$56 880	0	30 años
Batería	\$16 447	\$6 660	\$5 369	12 años
Celda de hidrógeno	\$90 000	\$90 000	0	40 000 h
Tanque de hidrógeno	\$50 000	\$37 500	0	25 años

Resultados económicos

Es relevante destacar que en este análisis económico se han considerado únicamente los costos de inversión, reemplazo, operación y mantenimiento de los componentes del sistema de abastecimiento energético del tranvía durante un período de 20 años, tal como se detalla en la Tabla 1. No se han incluido los costos relacionados con la instalación, conexión a la red, transmisión u otros costos de infraestructura, ya que estos podrían variar significativamente según el contexto y el alcance del proyecto. La omisión de estos costos adicionales se debe considerar como una limitación en este análisis económico (Arévalo et al., 2020).

En cuanto a los costos de inversión y operación de los nuevos elementos para impulsar el tranvía, también se han considerado los costos de compra de electricidad desde la red. Actualmente, el costo en Cuenca es de 9 centavos por kilovatio hora de energía (Arévalo et al., 2020), y este costo debe ser

cubierto por el consumo eléctrico de cada vagón tranviario. En caso de que las fuentes renovables produzcan un exceso de energía, esta puede venderse a la red eléctrica pública, lo que reduce aún más los costos energéticos. Según la normativa ecuatoriana, se consideran costos de 6 centavos por kilovatio hora relacionados con paneles solares y pequeñas hidroeléctricas (Arévalo et al., 2020).

En resumen, el tranvía con fuentes renovables tiene un costo total neto de 1,5 millones de dólares, que incluye el costo de inversión de sus componentes detallados en la Tabla 1 y las ganancias por la venta de electricidad a la red eléctrica pública. Este valor refleja la reducción de la dependencia de la red eléctrica pública.

El tranvía autónomo tiene un costo total neto de 1,7 millones de dólares, lo que lo convierte en un sistema más costoso que el anterior debido a que no cuenta con fuentes renovables y debe comprar más electricidad a la red eléctrica pública.

Para comparar, el costo de la energía comprada desde la red para abastecer al tranvía de Cuenca actual, sin considerar ningún sistema nuevo, es de aproximadamente 1,9 millones de dólares, sin incluir costos de mantenimiento.

Conclusiones

En este capítulo, se ha presentado un análisis de dos innovadores escenarios alternativos para impulsar el tranvía de Cuenca, Ecuador. El primer escenario, denominado “tranvía con fuentes renovables”, incorpora una mini red de energías renovables y sistemas a bordo que incluyen supercapacitores, baterías de litio y celdas de hidrógeno. El segundo escenario, denominado “tranvía autónomo”, requiere un único punto de carga al final del viaje de ida y vuelta y cuenta con sistemas a bordo similares a los del primer escenario, pero no depende de un sistema de catenarias para el suministro de energía.

Comparando el consumo de hidrógeno, se observa que el tranvía con fuentes renovables consume un 4,27 % menos de

hidrógeno en comparación con el tranvía autónomo. Además, los sistemas de propulsión del tranvía con fuentes renovables han demostrado una mayor capacidad para suministrar energía al tranvía en comparación con el tranvía autónomo. Sin embargo, el tranvía con fuentes renovables aún utiliza un sistema de catenarias en ciertos trayectos.

Desde una perspectiva económica, al comparar ambos escenarios durante un ciclo de operación de 20 años, el primero ahorra \$422 454,60 en comparación con el segundo escenario. Ambos escenarios ofrecen un ahorro de al menos \$300 000 con respecto al consumo energético actual en el tranvía de Cuenca. Es necesario recordar que en este análisis no se han incluido otros costos importantes para la implementación del sistema, incluyendo las obras civiles o los sistemas de transmisión energética y conexión a la red actual.

Este estudio ha demostrado que el tranvía de Cuenca puede ser impulsado utilizando fuentes de energía renovable, que incluyen el hidrógeno como una opción prometedora, sin depender de sistemas complejos de catenarias o subestaciones para la alimentación eléctrica, como ocurre en el Centro Histórico de Cuenca. Esto representa un cambio significativo en el costo y la complejidad del proyecto. Aunque el tranvía actual funciona correctamente, este estudio podría servir de base para futuras expansiones del sistema de tranvía hacia diferentes áreas de la ciudad, proporcionando un transporte limpio y seguro.

En resumen, la movilidad eléctrica a gran escala en Cuenca es una necesidad urgente. Al ser una ciudad de tamaño mediano, es crucial una planificación urbana sostenible que aborde la creciente demanda de transporte público de manera amigable con el medio ambiente y económicamente viable para los ciudadanos.

Es importante mencionar que este estudio tiene algunas limitaciones, como la omisión de los costos relacionados con la instalación, conexión a la red, transmisión y otros costos de infraestructura, lo que podría afectar significativamente los resultados económicos. Además, aunque se proponen escenarios de suministro energético alternativos, no se profundiza en la viabilidad técnica y económica de implementar estos sistemas

en la práctica ni en los posibles desafíos logísticos que podrían surgir. El tranvía autónomo depende en gran medida de la recarga energética al final de su recorrido o en puntos estratégicos, lo que podría plantear cuestiones sobre la infraestructura de carga, la velocidad de recarga y la disponibilidad de recursos energéticos. Estos aspectos deben considerarse en futuros desarrollos y expansiones del sistema de tranvía de Cuenca.

Referencias

Arévalo, P., Cano, A., Benavides, J., y Jurado, F. (2021). Feasibility study of a renewable system (PV/HKT/GB) for hybrid tramway based on fuel cell and super capacitor. *IET Renewable Power Generation*, 15(3), 491–503. <https://doi.org/10.1049/RPG2.12056>

Arévalo, P., Cano, A., y Jurado, F. (2020). Comparative study of two new energy control systems based on PEMFC for a hybrid tramway in Ecuador. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(46), 25357–25377. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.06.212>

García, P., Fernández, L. M., Torreglosa, J. P., y Jurado, F. (2013). Comparative study of four control systems for a 400-kW fuel cell battery-powered tramway with two dc/dc converters. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 23(7), 1028–1048. <https://doi.org/10.1002/ETEP.1636>

García, P., Torreglosa, J. P., Fernández, L. M., y Jurado, F. (2012). Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(11), 9368–9382. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2012.02.184>

Li, Q., Su, B., Pu, Y., Han, Y., Wang, T., Yin, L., y Chen, W. (2019). A state machine control based on equivalent consump-

tion minimization for fuel cell/ supercapacitor hybrid tramway. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(2), 552–564. <https://doi.org/10.1109/TTE.2019.2915689>

MathWorks. (s.f.). *MATLAB and Simulink® version 9.10.0 (R2021a)* (9.10.0 (R2021a)) [Software]. Recuperado el 29 de agosto de 2023, de <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

US National Renewable Energy Laboratory (NREL). (s.f.). *HOMER Pro ®—Microgrid Software for Designing Optimized Hybrid Microgrid* (3.16.2) [Software]. <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>

Al estudiar la movilidad urbana se puede aprender mucho sobre una ciudad, hablamos de la capacidad de planificación, de la importancia que se da al espacio público y al ambiente, de las inequidades sociales, de la salud de la población; a partir de esto podríamos afirmar: “Dime cómo te mueves y te diré que tipo de ciudad eres”.

ISBN: 978-9978-14-546-3



UCUENCA

