Rediseño de la infraestructura vial para la integración de los e-scooters en el transporte multimodal

Diego Daniel Pedroza-Perez
ITIS Software, Universidad de Málaga
España
pedroza@uma.es

Jamal Toutouh
ITIS Software, Universidad de Málaga
España
jamal@uma.es

Gabriel Luque
ITIS Software, Universidad de Málaga
España
gluque@uma.es

Abstract

Este artículo propone un enfoque multiobjetivo para optimizar la infraestructura urbana para la movilidad de los e-scooters. El problema abordado considera rediseñar la infraestructura vial para integrar los e-scooters en el sistema de transporte multimodal de una ciudad. La investigación busca mejorar el tiempo de viaje y la conectividad de los carriles bici, minimizando costes de instalación. Se utilizan algoritmos evolutivos multiobjetivo paralelos para resolver el problema en una instancia basada en Málaga. Los resultados muestran una exploración eficaz del frente de Pareto, ofreciendo soluciones de compromiso. El estudio se completa analizando las soluciones clave con el objetivo de evaluar los compromisos entre la mejora del tiempo de viaje, la conectividad, la multimodalidad y los costes de instalación. La visualización de los cambios de infraestructura propuestos muestra reducciones significativas en el tiempo de viaje y una mayor multimodalidad.

Resumen extendido de: D. D. Pedroza-Perez, J. Toutouh, and G. Luque. 2024. Redesigning road infrastructure to integrate e-scooter micromobility as part of multimodal transportation. In *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO '24)*, https://doi.org/10.1145/3638529.3654142.

1. Introducción

La micromovilidad, impulsada por los patinetes eléctricos (*e-scooters*), emerge como una alternativa sostenible a los vehículos de combustión interna en las ciudades. Sin embargo, esta tendencia presenta desafíos a los planificadores urbanos, quienes deben adaptar la infraestructura existente para acomodar estos vehículos más pequeños, garantizando la seguridad y eficiencia. La literatura reciente ha discutido diferentes desafíos relacionados con los e-scooters, como la ubicación de los puntos de estacionamiento [4] o el análisis y la prevención de lesiones [2]. Para reducir la probabilidad de accidentes, los carriles bici independientes son señalados como la mejor infraestructura urbana para los e-scooters. No obstante, se evidencia una notable escasez de estudios empíricos centrados en la adaptación de la infraestructura vial existente para optimizar la movilidad y seguridad de los e-scooters. Esta brecha en la literatura subraya la necesidad de estudios que examinen cómo optimizar la movilidad y seguridad de los e-scooters en el contexto urbano actual.

Este artículo resume el trabajo presentado [3] donde se aborda el problema **CURIReI** sobre el rediseño de la infraestructura vial para e-scooters mediante la inclusión de nuevos carriles bici. **CURIReI** considera el tiempo total de viaje, la conectividad de los carriles bici y los costes de instalación. El

problema se aborda empleando dos algoritmos evolutivos paralelos basados en NSGA-II y SPEA2 y se valida sobre una instancia realista de Málaga utilizando datos abiertos.

2. Descripción del Problema

El problema tiene como entrada el mapa de la ciudad, representado como un grafo dirigido $M = (V, E)$, donde los nodos (V) representan puntos de interés de la ciudad y las aristas (E) representan tramos de carretera. Las aristas se dividen en dos conjuntos: aquellas adecuadas para la instalación de carriles bici y aquellas donde la instalación no es factible o necesaria. Cada arista se asocia con funciones que representan la longitud del tramo de carretera y la reducción del tiempo de viaje obtenida al añadir un carril bici. El estudio también considera un conjunto de rutas de interés (R), representadas por sus orígenes y destinos.

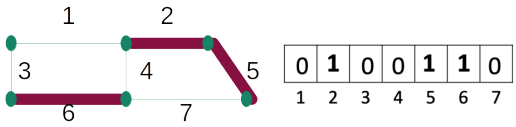

Figura 1: Codificación de la solución: Ejemplo de carriles bici instalados. El eje más ancho y de color vinotinto indica que un carril bici fue instalado.

Este problema consiste en encontrar un vector binario $\vec{x} = \{x_1, x_2, ..x_n\}$ solución, donde cada x_i indica si se coloca una nueva infraestructura de carril bici (1) o no (0). En la Figura 1 se muestra una ejemplo de la codificación de la solución. Se busca minimizar el tiempo medio de viaje, la interrupción de los carriles bici y el coste total de implementación. La formulación matemática del problema se presenta de forma detallada en [3].

3. Algoritmos y Métricas

En este trabajo, se estudian versiones paralelas de NSGA-II y SPEA2 que implementan el paradigma maestro-esclavo y que cuentan con un archivo de soluciones para guardar las mejores soluciones [1]. Además, se analizan una combinación de métricas multiobjetivo (MO) y métricas orientadas al problema específico. Entre las métricas MO incluyen *Generational Distance* (gd), *Inverted Generational Distance* (igd), dispersión de soluciones ($spread$), número de soluciones no dominadas ($\#nds$) e hipervolumen relativo (rhv). Por otro lado, las métricas orientadas al problema comprenden el tiempo medio de viaje necesario para completar todas las rutas utilizando la infraestructura propuesta, el coste asociado a la implementación de dicha infraestructura, y la cantidad de interrupciones o cambios de modo entre el uso de e-scooters y el desplazamiento a pie.

4. Resultados y Análisis

Los resultados muestran que NSGA-II y SPEA2 exploran eficientemente el frente de Pareto. NSGA-II es más competitivo en rhv, gd, igd,$spread$, y $\#nds$ que SPEA2. En la Tabla 1 están resumidos los resultados con las métricas de MO.

Tabla 1: Resultados de las métricas MO para los métodos estudiados.

métricas	NSGA-II			SPEA2		
	min	mediana	max	min	mediana	max
$rhv \uparrow$	0.138	**0.396**	0.517	0.075	0.257	0.473
$gd\ (\times 10^{-3}) \downarrow$	5.754	**12.438**	27.925	3.905	14.695	25.386
$igd\ (\times 10^{-3}) \downarrow$	25.011	**32.557**	127.977	25.277	44.910	135.872
$spread \uparrow$	3.127	**6.178**	9.184	2.492	4.451	7.588
$\#nds \uparrow$	56	**147**	270	47	116	242

Desde el punto de vista del problema, se analizó de forma detenida algunas soluciones destacadas como: s_{none}, s_{all}, y s_{bal}. La solución que representa el estado actual, s_{none}, es una solución que no propone ningún cambio en la infraestructura vial y que optimiza costos (sin costo alguno). Por otro lado, s_{all} es una solución que incluye todos los carriles bici posibles y reduce el tiempo de viaje en casi un 20 %, pero con un alto coste. Y finalmente, s_{bal} es la solución más cercana al vector ideal en el frente obtenido por ambos algoritmos. En ella se puede evidenciar un compromiso entre tiempo de viaje (15 % de mejora) y coste (menos de la mitad de s_{all}). La Tabla 2 resume las métricas de las soluciones. s_{none} muestra menos cambios de modo debido a la escasez de carriles bici, aumentando desplazamientos a pie y el tiempo de viaje. Al incrementar carriles bici, se reduce el tiempo de viaje pero pueden aumentar los cambios de modo si hay interrupciones. Esto evidencia la necesidad de equilibrar conectividad, tiempo de viaje y costes. La Figura 2 compara s_{none} y s_{bal}, mostrando cómo s_{bal} mejora la multimodalidad al añadir carriles bici cerca de estaciones de metro, permitiendo el uso de transportes públicos más eficientes.

Tabla 2: Características de soluciones destacadas.

Solución	Tiempo (s)	Coste (M€)	Cambios de modo (%)
s_{none} (actual)	1715.54	0.0	1.7
s_{all} (con todos los carriles bici)	1392.83	60.51	5.21
s_{bal} (propuesta por algoritmos)	1488.13	28.42	9.92

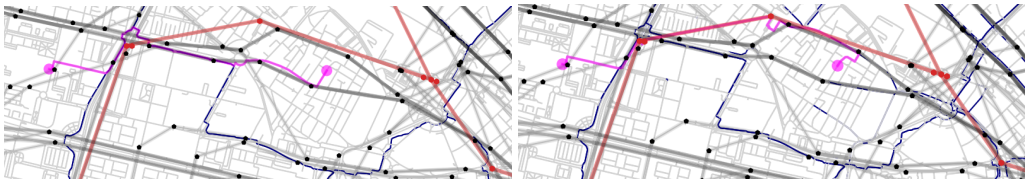

Figura 2: Ejemplo de una ruta propuesta: originalmente sin uso del metro (izquierda) vs. utilizando s_{bal} con transporte público (derecha). En rojo: vías y estaciones de metro; en negro: paradas y rutas de autobús; en azul: caminos de e-scooter; en fucsia: ruta de muestra.

5. Conclusiones

Este enfoque multiobjetivo optimiza la planificación de la micromovilidad urbana, considerando las opciones de transporte multimodal. El trabajo futuro validará los algoritmos en otras ciudades y explorará nuevos enfoques algorítmicos.

Acknowledgments and Disclosure of Funding

Esta investigación está parcialmente financiada por la Universidad de Málaga (UMA), así como por la subvención PRE2021-100645 por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+. Agradecemos al centro de Supercomputación y Bioinformática de la UMA por sus recursos y asistencia.

Referencias

[1] E. Alba, G. Luque, and S. Nesmachnow. Parallel metaheuristics: recent advances and new trends. *International Transactions in Operational Research*, 20(1):1–48, 2013.

[2] S. Gössling. Integrating e-scooters in urban transportation: Problems, policies, and the prospect of system change. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 79:102230, 2020.

[3] D. D. Pedroza-Perez, J. Toutouh, and G. Luque. Redesigning road infrastructure to integrate e-scooter micromobility as part of multimodal transportation. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, GECCO '24, page 1336–1344, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.

[4] M. Zakhem and J. Smith-Colin. Micromobility implementation challenges and opportunities: Analysis of e-scooter parking and high-use corridors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 101:103082, 2021.