Metaheurísticas para la planificación ferroviaria en mercados liberalizados: un estudio comparativo y reproducible

David Muñoz-Valero[1][0000−0002−2509−9911], Juan Moreno-Garcia[1][0000−0003−2430−145X] Julio Alberto López-Gómez[2][0000−0001−6291−6637], Enrique Adrian Villarrubia-Martin[2][0009−0002−8006−5711], and Luis Rodriguez-Benitez[1][0000−0002−2737−5887]

[1] Escuela de Ingeniería Industrial y Aeroespacial, Departamento de Tecnologías y Sistemas de Información, Universidad de Castilla-La Mancha, 45071, Toledo, España
juan.moreno,david.munoz@uclm.es
[2] Escuela Superior de Informática, Departamento de Tecnologías y Sistemas de Información, Universidad de Castilla-La Mancha, 13071, Ciudad Real, España
enrique.villarrubia,julioalberto.Lopez,luis.rodriguez@uclm.es

Abstract. La planificación de horarios en mercados ferroviarios liberalizados constituye un problema de optimización de elevada complejidad combinatoria. Este trabajo presenta una formulación matemática del problema de planificación de horarios orientada a maximizar el beneficio del gestor de la infraestructura mediante la asignación eficiente de servicios ferroviarios. Sobre esta formulación se desarrolla un marco experimental reproducible basado en metaheurísticas y computación bioinspirada. Este estudio evalúa de forma homogénea diez metaheurísticas representativas, incluyendo algoritmos evolutivos, técnicas de inteligencia de enjambres y enfoques híbridos. La comparación considera calidad de solución, comportamiento convergente, robustez, sensibilidad a hiperparámetros y escalabilidad, incorporando además un análisis frente a un enfoque exacto basado en programación matemática. Los resultados muestran diferencias significativas entre las técnicas analizadas y evidencian que el algoritmo genético proporciona el mejor equilibrio entre calidad de las soluciones, estabilidad y velocidad de convergencia.

Keywords: Planificación de horarios · Mercados ferroviarios liberalizados · Metaheurísticas · Métodos exactos

1 Introducción

La liberalización progresiva del transporte ferroviario europeo ha transformado el proceso tradicional de construcción de horarios. Frente a los modelos centralizados clásicos, el gestor de la infraestructura (IM, por sus siglas en inglés) debe coordinar las solicitudes procedentes de múltiples operadores ferroviarios (en inglés RUs) que compiten por recursos limitados.

Este trabajo clave resume y difunde los resultados obtenidos en un artículo de referencia previamente publicado [1]. El principal interés del estudio reside en cuatro aportaciones metodológicas: una formulación competitiva entre los operadores ferroviarios y el gestor de infraestructura, una heurística determinista para la resolución de conflictos y construcción de horarios factibles, un marco experimental reproducible basado en la biblioteca de Python MEALPY [2] y un benchmarking homogéneo de diez metaheurísticas bajo condiciones experimentales idénticas.

2 Formulación del problema

El problema considerado puede formularse como un problema de optimización donde el IM debe decidir qué servicios ferroviarios planificar y cómo ajustar sus horarios con respecto a las solicitudes recibidas por las RUs para maximizar el beneficio global obtenido. La función objetivo combina los ingresos derivados de la asignación de la capacidad ferroviaria con penalizaciones asociadas a desviaciones respecto a los horarios solicitados por los operadores. De forma simplificada, el problema puede expresarse como:

$$\max \sum_{i \in S} B_i \left(c_i - P_i\right)$$

donde B_i indica si el servicio i es programado, c_i representa el ingreso asociado al servicio y P_i recoge el valor de las penalizaciones derivadas de las restricciones operativas.

La complejidad del problema viene determinada por la coexistencia de múltiples restricciones operativas, entre las que destacan los intervalos máximos de modificación temporal permitidos, los tiempos mínimos de circulación entre estaciones, los tiempos de parada y las restricciones de seguridad que impiden conflictos entre servicios. Desde la perspectiva de optimización, el aspecto más relevante es la existencia de un compromiso entre dos objetivos contrapuestos. Por una parte, el IM busca maximizar el número de servicios aceptados y los ingresos asociados. Por otra, las modificaciones excesivas respecto a las solicitudes originales generan penalizaciones económicas que reducen dichos beneficios.

El marco de optimización desarrollado reproduce la interacción competitiva entre las RUs y el IM mediante un proceso de generación de solicitudes, optimización de horarios, detección de conflictos y construcción de soluciones factibles. El sistema transforma las solicitudes iniciales de las RUs en vectores continuos de tiempos de salida susceptibles de ser optimizados mediante diferentes algoritmos. Una característica especialmente relevante es la incorporación de una heurística determinista de resolución de conflictos. Las metaheurísticas generan propuestas continuas que no necesariamente corresponden a horarios factibles. Para resolver este problema se emplea un procedimiento voraz que identifica conflictos, selecciona iterativamente los servicios con mayor beneficio esperado y construye horarios finales libres de incompatibilidades.

El marco experimental se implementa sobre la biblioteca MEALPY [2], lo que garantiza la utilización de implementaciones homogéneas y facilita la reproducibilidad de los experimentos. Sobre esta plataforma se evaluaron diez algoritmos representativos de distintas familias de metaheurísticas: Algoritmo Genético (GA), Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), Evolución Diferencial (DE), Colonia de Abejas Artificial (ABC), Optimización Continua de Colonias de Hormigas (ACOR), Estrategia de Adaptación y Evolución de la Matriz de Covarianza (CMA-ES), Optimizador del Lobo Gris (GWO), Algoritmo de Optimización de la Ballena (WOA), Enfriamiento Simulado (SA) y un algoritmo híbrido entre GWO y WOA.

La comparativa considera múltiples dimensiones de rendimiento: calidad de las soluciones obtenidas, velocidad de convergencia, robustez frente a ejecuciones repetidas, sensibilidad a hiperparámetros y escalabilidad. Finalmente, otro aspecto destacable es la incorporación de un enfoque exacto basado en programación matemática utilizando Solver Constraint Integer Programs (SCIP) como referencia [3]. Esta comparación permite analizar las fortalezas y limitaciones relativas de las metaheurísticas frente a métodos exactos tradicionales.

3 Resultados y discusión

Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas entre las metaheurísticas analizadas.

El GA aparece como la alternativa más competitiva del estudio. De forma consistente, alcanza los mayores niveles de beneficio para el IM, presenta una convergencia rápida y mantiene una baja variabilidad entre ejecuciones independientes. PSO y ACOR también obtienen resultados competitivos, aunque muestran una convergencia más lenta y una mayor sensibilidad a la configuración de hiperparámetros. Otros algoritmos como GWO y WOA presentan comportamientos intermedios. Aunque son capaces de encontrar soluciones de calidad razonable, muestran mayores dificultades para refinar las soluciones durante las fases finales de búsqueda.

Los experimentos de sensibilidad evidencian además la importancia del ajuste de hiperparámetros. En varios algoritmos se observan diferencias significativas de rendimiento asociadas a modificaciones relativamente pequeñas de sus parámetros de control. Desde la perspectiva de la convergencia, el GA mantiene una progresión estable hacia regiones de alta calidad del espacio de búsqueda. Por el contrario, algunos métodos presentan estancamiento prematuro o trayectorias más erráticas.

Asimismo, los experimentos de escalabilidad constituyen otro resultado especialmente relevante. A medida que aumenta el número de solicitudes de horarios, los métodos exactos comienzan a mostrar limitaciones computacionales importantes. En contraste, las metaheurísticas mantienen tiempos de resolución razonables y una degradación gradual de la calidad de las soluciones. La comparación con SCIP [3] confirma esta tendencia. La Tabla 1 muestra cómo aunque los métodos exactos resultan adecuados para instancias reducidas, las metaheurís-

ticas ofrecen una mejor relación entre calidad de solución y coste computacional cuando el tamaño del problema crece.

Table 1. Resultados GA y SCIP en problemas sobre 25 y 50 peticiones de servicio

Métrica	**25 servicios**		**50 servicios**	
	GA	**SCIP**	**GA**	**SCIP**
Variables	**Binarias**: 25 **Continuas**: 58		**Binarias**: 50 **Continuas**: 123	
Mejor Beneficio	4457.33	**4471.52**	**6838.61**	4145.98
Tiempo	**174.37s**	53min	**570.11s**	503min
Trenes Planificados	19	19	**29**	21

4 Conclusiones y trabajos futuros

La principal contribución reside en el desarrollo de un entorno reproducible para la comparación sistemática de algoritmos bioinspirados. El benchmarking realizado pone de manifiesto la importancia de comparar algoritmos bajo condiciones experimentales homogéneas, así como de incorporar análisis de robustez, sensibilidad a hiperparámetros y escalabilidad. Como línea futura de investigación, cabe extender el marco experimental a escenarios multiobjetivo, incorporar mecanismos automáticos de ajuste de hiperparámetros y explorar estrategias híbridas que combinen metaheurísticas y métodos exactos.

Acknowledgments. Los autores quieren agradecer al departamento de Tecnologías y Sistemas de Información (TSI) de la Universidad de Castilla la Mancha (UCLM) y al proyecto *ATENEA: Aprendizaje Profundo, Metaheurísticas y Conocimiento Experto para Sistemas Multiagente en Entornos Ferroviarios Liberalizados Parcialmente Observables*(Referencia 2025-GRIN-38352), cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), la financiación necesaria para la difusión de este trabajo. Además, se realizó cuando Enrique Adrian Villarrubia-Martin era becario predoctoral de la Universidad de Castilla-La Mancha financiado por el Fondo Social Europeo Plus (FSE+)..

References

1. Muñoz-Valero D., Moreno-Garcia J., López-Gómez J.A., Villarrubia-Martin E.A. y Rodriguez-Benitez L. An approach to the timetabling problem in deregulated railway markets based on metaheuristic algorithms. Integrated Computer-Aided Engineering, 2025.
2. Van Thieu N. MEALPY: An Open-Source Library for Latest Meta-Heuristic Algorithms in Python. Journal of Systems Architecture, 2023.
3. Bestuzheva K., Bolusani S., Eifler L., et al. The SCIP Optimization Suite 9.0. Optimization Online, 2024.