

# **Comparativa entre los algoritmos generativos de Strength Pareto Evolutionary Algorithm y un Multi-Objective Ant Colony System para la resolución del Problema de enrutamiento de un vehículo con ventanas de tiempos**

Matías S. Ramírez<sup>1</sup>, Matías L. González<sup>1</sup>, Julio M. Paciello<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad Politécnica, Universidad de Nacional de Asunción,  
Campus Universitario de la UNA, San Lorenzo, Paraguay

<sup>2</sup> Departamento de Informática, Facultad Politécnica, Universidad de Nacional de Asunción,  
Campus Universitario de la UNA, San Lorenzo, Paraguay

<sup>1</sup>{ramirezmatias946, matias041198}@fpuna.edu.py, <sup>2</sup>julio.paciello@pol.una

**Resumen.** Este estudio presenta un análisis comparativo integral de dos destacados algoritmos de optimización multiobjetivo: el algoritmo evolutivo de Pareto de fuerza (SPEA) y el sistema de colonias de hormigas multiobjetivo (MOACS), aplicados al problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW). Nuestra investigación tiene como objetivo evaluar la efectividad, eficiencia y calidad de la solución de estos algoritmos para abordar las complejas limitaciones y objetivos de VRPTW. Implementamos SPEA con estrategias de cruce uniforme y mutación personalizadas para mantener la integridad de la ruta y al mismo tiempo garantizar la diversidad. MOACS se configuró con reglas de actualización de feromonas e información heurística para equilibrar la exploración y la explotación. El rendimiento de ambos algoritmos se evaluó en un conjunto de instancias VRPTW de referencia, considerando métricas como la distancia total de la ruta, la cantidad de vehículos utilizados y el cumplimiento de las ventanas de tiempo. Nuestros resultados indican que, si bien SPEA se destaca en la generación de diversos conjuntos de soluciones, MOACS demuestra una eficiencia superior al converger hacia soluciones de alta calidad. Los hallazgos aportan información valiosa sobre las fortalezas y limitaciones de cada algoritmo, ofreciendo orientación para seleccionar métodos apropiados para VRPTW y problemas similares de optimización logística.

**Palabras clave:** SPEA, MOACS, VRPTW, optimización multiobjetivo, comparación de algoritmos

## 1 Introducción

El Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW) se presenta como un desafío significativo en el campo de la optimización combinatoria y la logística, donde la eficiencia y efectividad en la asignación de rutas son cruciales. Este problema no solo implica la minimización del costo total de las rutas, sino también el cumplimiento de restricciones operativas como las ventanas de tiempo para las entregas y la capacidad de los vehículos. En este contexto, la aplicación de algoritmos de optimización multiobjetivo ha ganado un interés considerable, proporcionando soluciones que equilibran múltiples criterios conflictivos.

Entre los enfoques más destacados en esta área se encuentran el Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) y el Multi-Objective Ant Colony System (MOACS). SPEA, conocido por su capacidad de generar un conjunto diverso de soluciones óptimas en el frente de Pareto, utiliza operadores genéticos para explorar eficazmente el espacio de soluciones. Por otro lado, MOACS, una adaptación del sistema de colonia de hormigas al contexto multiobjetivo se basa en la búsqueda estocástica y el comportamiento cooperativo para encontrar rutas óptimas.

Este estudio se enfoca en una comparación entre SPEA y MOACS en el contexto del VRPTW, con el objetivo de identificar sus fortalezas y debilidades en términos de calidad de solución, eficiencia computacional y capacidad para manejar las restricciones del problema. Se implementaron variantes de ambos algoritmos, adaptadas específicamente para el VRPTW, y se evaluaron utilizando un conjunto de instancias de referencia. Los resultados obtenidos buscan proporcionar una guía valiosa para los investigadores y profesionales en la elección del algoritmo más adecuado para aplicaciones específicas en el campo del ruteo de vehículos.

## 2 Descripción del Problema

El Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW, por sus siglas en inglés) es una variante compleja y más realista del clásico Problema de Ruteo de Vehículos (VRP). En el VRPTW, el objetivo principal es diseñar rutas óptimas para una flota de vehículos con el fin de satisfacer las demandas de un conjunto de clientes, minimizando el costo total, que generalmente incluye la distancia total recorrida, el tiempo de viaje, o el número de vehículos utilizados.

Lo que distingue al VRPTW del VRP estándar son las restricciones de las ventanas de tiempo. Cada cliente tiene una ventana de tiempo específica dentro de la cual el servicio (por ejemplo, la entrega o la recolección) debe comenzar. Esto añade una capa adicional de complejidad al problema, ya que no solo se deben planificar las rutas para minimizar los costos, sino también para asegurar que las llegadas a los destinos de los clientes se realicen dentro de sus respectivos intervalos de tiempo permitidos.

El incumplimiento de estas ventanas de tiempo puede resultar en soluciones infeasibles o en la imposición de penalizaciones, dependiendo de la formulación específica del problema. Además, el VRPTW generalmente incluye otras restricciones operativas,

como la capacidad limitada de los vehículos, lo que significa que el volumen total de los bienes transportados por un vehículo no debe exceder su capacidad máxima.

El VRPTW es notablemente relevante en la logística y la gestión de la cadena de suministro, donde la puntualidad y la eficiencia son cruciales. Este problema ha sido ampliamente estudiado en la investigación operativa y la inteligencia artificial debido a su complejidad computacional y su importancia práctica, representando un reto significativo para los algoritmos de optimización.

### 3 Algoritmos Implementados

En el caso de la implementación del SPEA, se destacan los siguientes algoritmos:

**Establecer parámetros:**

Se utilizará para establecer parámetros utilizados en el algoritmo como la tasa de cruce, la máxima cantidad de generaciones, etc.

**Generar población inicial:**

Se genera la primera población a utilizar en el algoritmo, se realiza de forma aleatoria teniendo en cuenta que se respeten en lo que se puede las ventanas de tiempo.

**Inicializar el frente Pareto externo:**

Se toma la población inicial y se encuentra su frente Pareto.

**SPEA:**

El algoritmo itera hasta que se cumplan la cantidad de generaciones o se supere un límite de tiempo dado. Primeramente, evalúa el fitness de cada uno de los individuos como se plantea en el paper de SPEA de Zitzler y Thiele, y con esto ajusta el conjunto Pareto externo, combinándolo con el frente Pareto de la población actual respetando la dominancia Pareto. Luego de esto aplica los operadores genéticos de cruce y mutación habituales.

Para la implementación del MOACS el algoritmo trabaja de la siguiente forma: Primeramente, inicializa una tabla de feromonas, se encuentran soluciones siguiendo los pasos de un AC normal, luego se verifica los objetivos y de esto se genera el frente Pareto de soluciones. Posteriormente se actualizan las tablas de feromonas acordeamente y se verifica si en el frente Pareto hay una solución mejor a la global.

### 4 Resultados Experimentales

Al ejecutar ambas implementaciones en entornos de Google Colab, se observó que de las dos el algoritmo de MOACS, si bien tomaba un tiempo mayor en su ejecución, generaba rutas más factibles que el SPEA, que nos generaba caminos que podían violar las restricciones de ventanas de tiempos y esto no era directamente corregido en la mutación y cruce.

### 5 Conclusión

Pudimos observar que la implementación del MOACS genera en general mejor rutas a pesar de su implementación más tediosa y más difícil de entender en cada una de sus iteraciones, en donde el SPEA se puede simplificar bastante dependiendo de cómo se busque representar los datos.

## 6 Referencias

1. “*Vehicle Routing Problem with Time Windows*”. Retrieved from <https://developers.google.com/optimization/routing/vrptw>