



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA

Diseño y desarrollo de un sistema de apoyo al Servicio de Transporte Accesible (STA) del MIDES

Informe de Proyecto de Grado presentado por

Rodrigo González, Fernando Penadés y Juan Pablo
Rubio

en cumplimiento parcial de los requerimientos para la graduación de la carrera
de Ingeniería en Computación de Facultad de Ingeniería de la Universidad de
la República

Supervisores

Omar Viera - Sandro Moscatelli
Libertad Tansini

Montevideo, Uruguay
11 de setiembre de 2025



Diseño y desarrollo de un sistema de apoyo al Servicio de Transporte Accesible (STA) del MIDES por Rodrigo González, Fernando Penadés y Juan Pablo Rubio tiene licencia [CC Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Agradecimientos

Queremos agradecer a nuestros tutores académicos, Omar Viera y Sandro Moscatelli, por su orientación técnica durante todo el proceso, así como a Libertad Tansini por su apoyo continuo. La contribución de los tres fue fundamental para definir el alcance del proyecto en sus etapas iniciales, destrabar situaciones complejas durante el desarrollo y validar tanto la solución final como este informe en la etapa de cierre.

Agradecemos también a Germán Amondarain y Leonardo Gulpio, del Servicio de Transporte Accesible del MIDES, por brindarnos acceso a la información, colaborar en instancias de validación y participar activamente en la definición de los requerimientos del sistema. Sus aportes fueron clave para orientar el desarrollo de la aplicación hacia las necesidades reales del servicio.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias y amistades por su paciencia, apoyo emocional y constante estímulo a lo largo de este proyecto, así como a nuestros respectivos trabajos, por habernos brindado la flexibilidad necesaria para dedicar el tiempo suficiente al desarrollo del mismo.

Resumen

El presente trabajo aborda el desafío logístico de la planificación de rutas para el Servicio de Transporte Accesible (STA) del MIDES, una operación compleja realizada hasta ahora de forma manual, con las consecuentes ineficiencias y limitaciones de escalabilidad que esto conlleva. La operativa del STA se modela formalmente como un Problema de Viaje a Demanda (Dial-a-Ride Problem, DARP), una variante NP-hard del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP, por sus siglas en inglés). Para resolverlo, se diseñó y desarrolló un sistema de software integral que automatiza y optimiza la creación de las hojas de ruta diarias.

La solución se basa en una arquitectura modular desacoplada que incluye: una aplicación web de gestión para los operadores (desarrollada en React y Vue), un backend para la persistencia de datos (Python/FastAPI con PostgreSQL), y un motor de optimización autónomo (Java). Este último integra herramientas de código abierto como Google OR-Tools para la resolución del problema de ruteo y OSRM (Open Source Routing Machine) para el cálculo de matrices de tiempo y distancia. El sistema gestiona restricciones complejas como ventanas de tiempo, capacidades heterogéneas de la flota de vehículos, precedencia de recogidas y entregas, y tiempos máximos de viaje por usuario.

La validación del sistema se realizó mediante una rigurosa experimentación, que incluyó la justificación algorítmica de las metaheurísticas de OR-Tools y la comparación de las planificaciones optimizadas, contra datos de una jornada operativa real y de alta demanda proporcionada por MIDES. Los resultados demuestran una mejora sustancial: el tiempo de planificación se redujo de varias horas a menos de un minuto. Más importante aún, la solución optimizada logró atender a un mayor número de usuarios, utilizando la misma flota de vehículos, disminuyendo los viajes no asignados y garantizando por diseño el cumplimiento de todas las restricciones operativas. El sistema no solo representa una herramienta práctica que mejora la eficiencia y la calidad del servicio del STA, sino que también constituye una aplicación validada de técnicas de investigación operativa y desarrollo de software para resolver un problema de alto impacto social.

Palabras clave: Optimización de Rutas, Dial-a-Ride Problem (DARP), Transporte Accesible, Google OR-Tools, Investigación Operativa, Sistema de Apoyo a la Decisión

Índice general

1. Introducción	1
2. Revisión de antecedentes	3
2.1. Problemas Clásicos de Optimización de Rutas	4
2.1.1. Traveling Salesman Problem (TSP)	5
2.1.2. Vehicle Routing Problem (VRP)	5
2.1.3. Complejidad del VRP	6
2.2. Variantes del Vehicle Routing Problem	7
2.2.1. VRP con capacidades (CVRP)	7
2.2.2. VRP con ventanas de tiempo (VRPTW)	7
2.2.3. VRP con múltiples depósitos (MDVRP)	7
2.2.4. VRP con flota heterogénea (HVRP)	8
2.2.5. VRP con recogida y entrega (VRPPD)	8
2.3. Técnicas para Resolver el VRP	8
2.3.1. Métodos exactos	8
2.3.2. Heurísticas tradicionales	9
2.3.3. Metaheurísticas clásicas y modernas	14
2.4. El <i>Dial-a-Ride Problem</i> (DARP)	15
2.4.1. Definición formal	16
2.4.2. Restricciones adicionales	17
2.4.3. Variantes del DARP	18
2.5. Algoritmos y enfoques utilizados en la práctica	18
2.5.1. Librerías y <i>solvers</i> de optimización	19
2.5.2. Motores de cálculo de rutas y matrices	20
2.5.3. Comparacion	21
2.6. Aplicaciones reales del DARP	21
2.7. Relevancia del DARP para el problema del STA-MIDES	22
2.7.1. Correspondencia entre requisitos operativos y modelo DARP	22
2.7.2. Impacto en la calidad de servicio	22
2.7.3. Adecuación de las herramientas seleccionadas	23
2.7.4. Síntesis y transición	23
2.8. Conclusión del Capítulo	23

3. Requerimientos del sistema	25
3.1. Requerimientos funcionales	25
3.2. Requerimientos no funcionales	28
4. Metodología de trabajo	29
4.1. Enfoque general	29
4.2. Planificación y gestión	29
4.3. Dinámica de reuniones	29
4.4. Control de versiones	30
4.5. Interacción con tutores académicos	30
5. Diseño de la solución	31
5.1. Arquitectura general	31
5.2. Decisiones tecnológicas	33
5.2.1. Frontend	33
5.2.2. Backend	33
5.2.3. Base de datos	34
5.2.4. Geocodificador y mapas	34
5.2.5. Motor de optimización	34
5.3. Modelado del dominio	35
5.4. Flujos principales de uso	37
5.4.1. Creación de una solicitud de traslado	37
5.4.2. Creación y ruteo de una planificación	38
6. Experimentación	40
6.1. Introducción	40
6.1.1. Objetivos del Capítulo	41
6.1.2. Metodología Experimental	41
6.1.3. Métricas de Evaluación	43
6.1.4. Estructura del Capítulo	44
6.2. Configuración Experimental	44
6.2.1. Calibración del Perfil de Enrutamiento de OSRM	45
6.3. Selección y Justificación de la Estrategia de Optimización	46
6.3.1. Metodología del Análisis Comparativo	46
6.3.2. Resultados y Análisis	47
6.3.3. Selección de la Estrategia Óptima	51
6.4. Validación de Casos Base	52
6.4.1. Caso 1: Pedido de Solo Ida (Restricción en Destino)	52
6.4.2. Caso 2: Pedido de Solo Vuelta (Restricción en Origen)	53
6.4.3. Caso 3: Pedido de Ida y Vuelta	53
6.4.4. Resolución de Ambigüedades en las Ventanas de Tiempo	54
6.4.5. Optimización de Objetivos Múltiples: El Dilema entre Eficiencia y Calidad de Servicio	54
6.5. Análisis de Casos Reales: Planificaciones de MIDES	57
6.5.1. Simplificaciones del Modelo para la Validación Inicial	58
6.5.2. Análisis del Caso Real: Jornada de Alta Demanda	58

6.6. Validación del Modelo con Requisitos de Accesibilidad	66
6.7. Análisis de Escalabilidad y Rendimiento	68
7. Conclusiones y trabajo futuro	72
7.1. Conclusiones	72
7.1.1. Síntesis de resultados y logros	72
7.1.2. Logros alcanzados	73
7.1.3. Limitaciones del sistema y dificultades encontradas	73
7.2. Trabajo futuro	74
Referencias	75
A. Análisis Detallado de Metaheurísticas y Estrategias de Solución Inicial	78
A.1. Resultados Completos de las 84 Combinaciones	78
A.1.1. Descripción de las Métricas	78
A.1.2. Análisis de Convergencia en el Tiempo	80
B. Informes de Planificación Generados	88
B.1. Comparativa: Planificación Manual vs. Optimizada	88
B.2. Planificación Optimizada con Requisitos de Accesibilidad	96
B.3. Planificación Caso de Estudio de Escalabilidad	102

Capítulo 1

Introducción

El Servicio de Transporte Accesible (STA) del Ministerio de Desarrollo Social (MIDES) de Uruguay desempeña un papel fundamental al garantizar el derecho a la movilidad de personas con dependencia funcional. Diariamente, el STA enfrenta el desafío logístico de coordinar decenas de traslados entre domicilios particulares y centros de salud, educación, rehabilitación, entre otros. Esta operación implica gestionar una flota de vehículos con capacidades diversas, respetar ventanas horarias estrictas impuestas por citas médicas o turnos, y optimizar las rutas para maximizar la cobertura del servicio con recursos limitados. Hasta ahora, este complejo proceso de planificación se ha realizado de forma manual, lo cual es propenso a ineficiencias y difícil de escalar.

El problema subyacente a la operativa del STA puede ser modelado como una variante del *Vehicle Routing Problem* (VRP), conocida como el *Dial-a-Ride Problem* (DARP). Este modelo se caracteriza por gestionar pares de recogida y entrega (*pickup* y *delivery*) vinculados, flotas de vehículos con distintas capacidades (asientos convencionales, espacio para sillas de ruedas, rampas eléctricas), y múltiples restricciones de calidad de servicio, como ventanas de tiempo estrictas y límites máximos de duración del viaje por usuario. La naturaleza combinatoria de este problema (NP-hard) hace que encontrar una solución óptima sea computacionalmente intratable para instancias de tamaño real, lo que justifica el uso de algoritmos aproximados, en base a heurísticas y metaheurísticas avanzadas.

Este proyecto aborda dicho desafío mediante el diseño y desarrollo de un sistema de software integral de apoyo a la planificación del STA-MIDES. El objetivo general es automatizar y optimizar la generación de las hojas de ruta diarias, buscando mejorar la eficiencia operativa, aumentar la calidad del servicio y facilitar la labor de los planificadores. Para ello, se ha construido una solución tecnológica modular que combina una aplicación web para la gestión de solicitudes y recursos, con un potente motor de optimización.

Para cumplir con este propósito, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. **Modelar** formalmente la operativa del STA como una instancia del DARP, incorporando todas sus restricciones particulares: ventanas de tiempo, precedencia de paradas, y compatibilidad entre las necesidades de los usuarios y las características de los vehículos.
2. **Diseñar e implementar** una solución de software de arquitectura desacoplada, compuesta por un *frontend* interactivo (React/Vue), un *backend* para la gestión de datos (Python/FastAPI) y un motor de optimización autónomo (Java).
3. **Integrar y configurar** herramientas de código abierto de vanguardia para la resolución del problema, utilizando **Google OR-Tools** como *solver* de optimización y **OSRM** (*Open Source Routing Machine*) para el cálculo de matrices de tiempo y distancia.
4. **Validar empíricamente** la efectividad del sistema comparando las planificaciones optimizadas con las rutas generadas manualmente por el STA, utilizando datos operativos reales y analizando métricas clave de rendimiento y calidad.

Como resultado principal, se obtuvo un sistema funcional y robusto que reduce el tiempo de planificación de varias horas a menos de un minuto. La validación experimental, realizada sobre un caso de estudio real de alta demanda, demostró que las soluciones generadas por el sistema no solo son factibles, sino que superan a la planificación manual, al atender a un mayor número de usuarios con los mismos recursos, garantizando por diseño el cumplimiento de todas las restricciones operativas. Asimismo, el sistema demostró ser escalable, logrando manejar sin inconvenientes escenarios simulados con hasta tres veces la cantidad de solicitudes que se procesan actualmente a diario. Este valor no representa una cota máxima, ya que incluso en el entorno de prueba no se alcanzó el límite de capacidad, el cual podría ser aún mayor dependiendo de las características del entorno donde se implemente.

Este documento se organiza de la siguiente manera: el [Capítulo 2](#) presenta el marco teórico, donde se describen los problemas clásicos de ruteo, desde el TSP hasta el DARP, y se revisan las principales técnicas y herramientas utilizadas para su resolución. El [Capítulo 3](#) detalla el diseño del sistema propuesto, y en él se definen el alcance funcional y las restricciones de calidad. El [Capítulo 4](#) explica la forma de trabajo que siguió el equipo de desarrollo, mientras que en el [Capítulo 5](#) se describe la arquitectura general del sistema, las decisiones tecnológicas adoptadas y el modelo de dominio que guía la lógica de negocio. El [Capítulo 6](#) describe la configuración experimental y reporta los resultados obtenidos al validar el sistema sobre datos reales y simulados, incluyendo el análisis de escalabilidad y cumplimiento de restricciones clave como las ventanas de tiempo. Finalmente, el [Capítulo 7](#) presenta las conclusiones generales del proyecto y propone líneas de trabajo futuro para mejorar y extender el sistema.

Capítulo 2

Revisión de antecedentes

El desarrollo de sistemas inteligentes para la planificación de rutas en contextos urbanos representa un desafío técnico relevante dentro del campo de la optimización combinatoria y la ingeniería de software. En el marco del presente proyecto, orientado al diseño de un sistema de apoyo al Servicio de Transporte Accesible (STA) del MIDES, resulta fundamental establecer una base teórica sólida que permita comprender los problemas computacionales subyacentes, así como los modelos y enfoques existentes para abordarlos.

Este capítulo tiene como objetivo presentar el marco teórico que sustenta el diseño del sistema propuesto. Para ello, se explorarán en profundidad los problemas clásicos de ruteo, sus variantes y complejidades, con énfasis en el *Dial-a-Ride Problem* (DARP), que modela con precisión las características del dominio del STA. La elección de un enfoque adecuado no solo incide en la viabilidad computacional del sistema, sino que también define la calidad del servicio, su escalabilidad y capacidad de adaptarse a restricciones reales como las ventanas de tiempo, la flota heterogénea y los requerimientos de accesibilidad de los usuarios.

Desde la formulación inicial del proyecto, el problema operativo del STA-MIDES quedó predefinido como un *Dial-a-Ride Problem* (DARP) debido a rasgos intrínsecos del dominio: pares vinculados de recogida y entrega con precedencia, ventanas de tiempo, límites de tiempo a bordo por usuario y compatibilidades vehículo–usuario (véanse §2.4.1 y §2.7). En consecuencia, la revisión del estado del arte que sigue es breve y focalizada: se presentan los problemas canónicos (TSP/VRP) como base conceptual, se enumeran sus variantes más pertinentes y se profundiza en DARP, sin pretender una cobertura exhaustiva de todas las líneas de investigación relacionadas. Esta decisión metodológica se justifica porque no era necesario decidir el modelo (ya estaba determinado por los requisitos del STA-MIDES); la pregunta central del capítulo no es “¿qué modelo elegir?”, sino “¿cómo resolver instancias DARP a escala operativa con calidad de servicio y tiempos de cómputo adecuados?”. El lector encontrará, por tanto, una síntesis orientada a sustentar la selección de técnicas y herramientas empleadas más adelante, y no una revisión sistemática completa de la literatura.

El camino conceptual que conduce a la formulación del DARP, comienza con el **Problema del Cartero** (*Traveling Salesman Problem, TSP*), uno de los problemas más estudiados en la teoría de la computación. Este problema consiste en determinar el recorrido más corto que visita un conjunto de ciudades una sola vez y retorna al punto de origen. El TSP es conocido por ser NP-hard, lo cual implica que no existe un algoritmo eficiente conocido para resolverlo en todos los casos. A pesar de su formulación simple, su resolución exacta se vuelve intratable a medida que crece el número de nodos ([Applegate, Bixby, Chvátal, y Cook, 2007](#)).

A partir del TSP, surge el **Problema de Ruteo de Vehículos** (*Vehicle Routing Problem, VRP*), una generalización que considera múltiples vehículos, demandas de clientes, capacidades de transporte y otros factores logísticos. El VRP introduce un conjunto de restricciones operativas que reflejan escenarios reales en logística, distribución y transporte urbano ([Laporte, 2009](#)). Al igual que el TSP, el VRP pertenece a la clase de problemas NP-hard, lo que justifica el uso de heurísticas, metaheurísticas y enfoques híbridos en su resolución.

Dentro del amplio espectro de variantes del VRP, una de las más complejas y relevantes para contextos de transporte de personas es el **Dial-a-Ride Problem** (DARP). Este problema extiende el VRP con la inclusión de pares de recogida y entrega (pickup-delivery), ventanas de tiempo, tiempos máximos de viaje por usuario, compatibilidades entre vehículos y pasajeros, y otras restricciones específicas. En particular, el DARP es adecuado para modelar servicios como el transporte accesible, donde los usuarios requieren traslados personalizados con condiciones particulares de movilidad y horarios ([Cordeau y Laporte, 2007](#)).

La correcta comprensión del DARP y de sus soluciones computacionales es clave para el diseño del motor de optimización que sustenta el sistema del STAMIDES. En este capítulo se analizarán las formulaciones matemáticas de estos problemas, sus variantes más relevantes, los enfoques algorítmicos tradicionales y modernos para resolverlos, y una comparación crítica de herramientas disponibles en el ecosistema de software actual.

El recorrido teórico que se presenta a continuación no solo tiene valor académico, sino que habilita la fundamentación del diseño técnico del sistema, permitiendo traducir requisitos operativos reales en un modelo computacional bien definido y resoluble en tiempos razonables. Este marco será el sustento sobre el cual se construirá la arquitectura de solución en los capítulos siguientes.

2.1. Problemas Clásicos de Optimización de Rutas

El diseño de rutas óptimas ha sido un tema central en la investigación operativa desde mediados del siglo XX. Comprender los problemas fundacionales y su complejidad es crucial para seleccionar las técnicas de resolución adecuadas y dimensionar las expectativas de rendimiento de cualquier sistema de planifi-

cación. En esta sección se presentan los dos problemas canónicos —el *Traveling Salesman Problem* (TSP) y el *Vehicle Routing Problem* (VRP)— y se analiza la complejidad inherente que comparten.

2.1.1. Traveling Salesman Problem (TSP)

Definición formal. Sea $G = (V, E)$ un grafo no dirigido, donde $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ es el conjunto de $n + 1$ nodos (ciudades) y E es el conjunto de aristas con costos (o distancias) $c_{ij} \geq 0$ para cada par $i \neq j$. El objetivo del TSP consiste en encontrar un ciclo de costo mínimo que comience y termine en el nodo v_0 y visite cada nodo exactamente una vez, es decir, un ciclo hamiltoniano de costo mínimo. Matemáticamente, se busca:

$$\min_{\pi \in \mathcal{S}_n} (c_{0, \pi(1)} + \sum_{k=1}^{n-1} c_{\pi(k), \pi(k+1)} + c_{\pi(n), 0}),$$

donde \mathcal{S}_n es el conjunto de todas las permutaciones de $\{1, \dots, n\}$ (Applegate y cols., 2007).

Aplicaciones. Aunque el TSP se formuló originalmente para la planificación de un viajero, sus aplicaciones abarcan la manufactura de microchips, la planificación de rutas de inspección, la secuenciación de ADN y la impresión 3D, entre otras. Su simplicidad estructural lo convierte en un banco de pruebas para nuevos algoritmos de optimización y metaheurísticas (Gutin y Punnen, 2014).

Complejidad computacional. El TSP es NP-hard bajo reducción polinomial desde el problema del ciclo hamiltoniano; además, su versión de decisión es NP-completa. Esto significa que no se conoce ningún algoritmo que lo resuelva en tiempo polinomial para todo n y que es improbable que exista tal algoritmo mientras $P \neq NP$ (Garey y Johnson, 1979). Debido a esta complejidad, la investigación se ha centrado en algoritmos exactos con técnicas de poda (branch-and-bound, branch-and-cut) y en aproximaciones heurísticas para instancias de gran tamaño.

2.1.2. Vehicle Routing Problem (VRP)

Definición general. El VRP es una generalización del TSP que modela la distribución de bienes (o la prestación de servicios) desde un depósito central a un conjunto de clientes mediante una flota limitada de vehículos. Cada cliente $i \in C$ posee una demanda d_i y cada vehículo $k \in K$ tiene una capacidad Q_k . El objetivo clásico es minimizar el costo total (distancia, tiempo o combinación de ambos) cumpliendo las restricciones de capacidad y asegurando que cada cliente sea atendido una única vez (Laporte, 2009).

Diferencias y generalización respecto al TSP. Mientras que el TSP considera un solo viajero, el VRP introduce múltiples vehículos, capacidades y, potencialmente, ventanas de tiempo, múltiples depósitos u otras restricciones logísticas. Cada vehículo realiza un tour que es, en esencia, un TSP sobre el subconjunto de clientes que le corresponde. Por tanto, el VRP puede verse como la partición del conjunto de clientes en rutas factibles de TSP bajo restricciones adicionales (Toth y Vigo, 2014).

Objetivos típicos. Los criterios más comunes son:

- **Distancia total recorrida** (minimización de distancia).
- **Tiempo de operación** (fin de la última ruta).
- **Costo operacional** (puede incluir peajes, consumo de combustible, viáticos).

En versiones con ventanas de tiempo, se añade el objetivo secundario de minimizar penalizaciones por llegadas antes o después del intervalo permitido.

2.1.3. Complejidad del VRP

El VRP hereda la NP-hardness del TSP: si se restringe a un único vehículo con capacidad infinita, se reduce exactamente al TSP. Más aún, Lenstra y Rinnooy Kan demostraron que incluso variantes simplificadas, como el *Capacitated VRP* (CVRP) con demandas binarias, son NP-hard (Lenstra y Rinnooy Kan, 1979). Esta complejidad explica que los algoritmos exactos solo sean viables para instancias pequeñas o medianas, y que en aplicaciones reales se prefiera:

1. **Heurísticas constructivas** (p. ej. Clarke–Wright), que proporcionan soluciones iniciales rápidas.
2. **Metaheurísticas** (p. ej. Tabu Search, Simulated Annealing, Guided Local Search) para mejorar dichas soluciones.
3. **Métodos híbridos** que integran programación entera con búsquedas locales.

Dadas las restricciones adicionales presentes en el caso del STA-MIDES (ventanas de tiempo, requerimientos de accesibilidad, rutas de recogida y entrega), las heurísticas puras se vuelven insuficientes, motivando el uso de metaheurísticas avanzadas y solvers especializados como Google OR-Tools, capaces de manejar restricciones complejas sin sacrificar tiempos de cómputo operativos.

En síntesis, el TSP actúa como piedra angular teórica, el VRP brinda el marco logístico realista y su complejidad fundamenta el uso de técnicas aproximadas que, en los apartados siguientes, se especializarán hacia el *Dial-a-Ride Problem*.

2.2. Variantes del Vehicle Routing Problem

El *Vehicle Routing Problem* sirve de base para numerosos problemas logísticos que incorporan restricciones adicionales específicas de los dominios operativos. A continuación se describen cinco variantes ampliamente estudiadas, ilustrando en cada caso ejemplos representativos de aplicación práctica.

2.2.1. VRP con capacidades (CVRP)

En el **Capacitated VRP** cada vehículo $k \in K$ posee una capacidad máxima Q_k , mientras que cada cliente $i \in C$ requiere una demanda d_i tal que $\sum_{i \in \text{ruta}_k} d_i \leq Q_k$. El CVRP aparece cuando los productos transportados son homogéneos (p.ej. cajas, bebidas) y el factor limitante es el volumen o peso total (Toth y Vigo, 2014). A continuación se listan algunos ejemplos de uso:

- Distribución de bebidas en supermercados, donde los camiones tienen límites de peso.
- Recolección de residuos con compactadoras de volumen fijo.
- Entrega de garrafas de gas con capacidad expresada en kilogramos.

2.2.2. VRP con ventanas de tiempo (VRPTW)

El **VRP con ventanas de tiempo** (VRPTW) agrega a cada cliente i un intervalo $[e_i, l_i]$ en el que el servicio debe iniciarse. Si el vehículo arriba antes de e_i , suele admitirse espera; llegar después de l_i se penaliza o se considera inviable. Esta variante es esencial en servicios donde los clientes exigen franjas horarias específicas (Solomon, 1987). Algunos casos de uso son:

- Distribución de productos con entregas “9–12 h”, “14–18 h”.
- Ruteo de buses escolares con horarios fijos de recogida y entrega de alumnos.

2.2.3. VRP con múltiples depósitos (MDVRP)

En el **Multi-Depot VRP** se dispone de un conjunto D de depósitos desde los cuales parte y a los cuales regresa cada vehículo. El objetivo es asignar clientes a depósitos y construir rutas por depósito minimizando el costo global (Laporte, 2009). Algunas aplicaciones típicas son:

- Empresas de paquetería que operan varios hubs urbanos/regionales.
- Distribuidoras de combustibles con plantas en diferentes ciudades.

2.2.4. VRP con flota heterogénea (HVRP)

El **VRP con flota heterogénea** (HVRP) contempla vehículos con diferentes capacidades, costos fijos, costos variables o atributos (p. ej. refrigeración). El problema consiste en decidir simultáneamente cuántos y cuáles vehículos utilizar y cómo asignarles clientes (Baldacci, Battarra, y Vigo, 2007). Dentro de los ejemplos de uso se encuentran los siguientes:

- Empresas de logística que combinan distintos tipos de vehículos para hacer las entregas, como camionetas, camiones y bicicletas.
- Distribución de bienes con vehículos refrigerados y vehículos estándar.

2.2.5. VRP con recogida y entrega (VRPPD)

El **Pickup-Delivery VRP** extiende el modelo para incluir pares de nodos (p_i, d_i) , donde un ítem o pasajero debe ser recogido en p_i y entregado en d_i por el mismo vehículo, respetando precedencia (p_i antes que d_i). El VRPPD es la base del *Dial-a-Ride Problem* cuando los ítems son personas y se añaden restricciones de calidad de servicio (Parragh, Doerner, y Hartl, 2008). Algunos ejemplos de uso son:

- Servicios de ride-sharing y taxis por aplicación, donde cada viaje implica un origen y un destino.
- Logística inversa: recolección de productos a devolver y entrega en planta de reciclaje.

Estas variantes muestran cómo el VRP se adapta a contextos operativos específicos mediante restricciones adicionales. En la siguiente sección se discutirán las técnicas de resolución que permiten abordar dicha complejidad de forma eficiente.

2.3. Técnicas para Resolver el VRP

La diversidad de restricciones presentes en las variantes del Vehicle Routing Problem (VRP) hace que ningún enfoque único satisfaga todos los requisitos de exactitud y eficiencia. En la práctica, los métodos de resolución se agrupan en cuatro grandes familias: (i) algoritmos exactos basados en programación lineal entera y *branch & bound*, (ii) heurísticas constructivas clásicas, (iii) metaheurísticas modernas de búsqueda intensiva, y (iv) enfoques recientes basados en aprendizaje automático. Esta sección resume los principios e hitos de cada categoría y discute sus dominios de aplicación.

2.3.1. Métodos exactos

Los métodos exactos buscan la *optimalidad global* resolviendo formulaciones de programación lineal entera (PLE) o de *set partitioning*. El modelo clásico

introduce variables binarias x_{ijk} que indican si el vehículo k recorre la arista (i, j) (Toth y Vigo, 2014). Para escapar de la explosión combinatoria de rutas, se utilizan técnicas de *column generation* y *price-and-branch*, donde el problema maestro restringido se complementa con subproblemas de ruta más pequeños.

Branch & bound y **branch & cut** refinan esta idea mediante poda sistemática del árbol de soluciones y la adición dinámica de *cortes válidos* (p. ej. cuts subtour, clique cuts). Estas estrategias, implementadas en solvers comerciales como CPLEX o Gurobi, permiten resolver instancias de hasta unos pocos cientos de clientes, especialmente en variantes “básicas” (CVRP, VRPTW reducido) (Baldacci, Mingozzi, y Roberti, 2011).

Limitaciones de escalabilidad. La complejidad explícita crece exponencialmente con el número de clientes y vehículos. Además, las variantes con múltiples depósitos, flota heterogénea o pickups/deliveries aumentan dramáticamente el espacio de rutas. Por ello, en contextos operativos con miles de solicitudes (por ejemplo, paquetería “same-day”), los métodos exactos son inviables sin descomposición adicional o sin sacrificar optimalidad.

2.3.2. Heurísticas tradicionales

Las heurísticas constructivas buscan una solución inicial rápida aplicando reglas simples y determinísticas; se utilizan tanto en sistemas de planificación *on-line* como punto de partida de metaheurísticas más intensivas.

Heurísticas clásicas de construcción.

- **Savings de Clarke–Wright** (1964): calcula el ahorro de fusionar dos rutas estrella en una, basándose en la reducción de distancia total (Clarke y Wright, 1962). Su complejidad típica es $O(n^2 \log n)$ y produce buenos resultados en CVRP.
- **Sweep Algorithm**: ordena los clientes por ángulo polar respecto al depósito y los va asignando a rutas hasta agotar capacidad.
- **Nearest Neighbor / Cheapest Insertion (básico)**: construye rutas añadiendo el cliente “más cercano” o la inserción de menor costo marginal factible.

Heurísticas de inserción para VRPTW y variantes. Dentro de los métodos constructivos, las heurísticas de inserción ocupan un lugar destacado, especialmente en el *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW). La idea general consiste en partir de rutas vacías o incompletas y, en cada iteración, insertar visitas en la posición que genere el menor aumento de costo, siempre respetando restricciones de capacidad y de ventanas temporales. La literatura distingue dos grandes familias: la *inserción secuencial*, donde se construye una ruta por vez, y la *inserción paralela*, en la que todas las rutas se van construyendo en simultáneo.

(a) **Inserción secuencial (Solomon).** El método de Solomon (Solomon, 1987) consiste en elegir una visita inicial (llamada *semilla*) y formar con ella el núcleo de una ruta. Posteriormente se van insertando visitas de forma iterativa, siempre seleccionando aquella que, al añadirse, provoque el menor aumento de costo factible. Cuando no existen más inserciones posibles, se inicia una nueva ruta con otra semilla.

Este procedimiento permite un control relativamente sencillo de la factibilidad temporal, pues la propagación de horarios se actualiza después de cada inserción. Además, variantes del algoritmo proponen diferentes criterios para seleccionar la semilla (ej. clientes más alejados, ventanas más tempranas) y diferentes métricas para evaluar la inserción (distancia adicional, holgura temporal, penalizaciones por retraso). Aunque la complejidad es cercana a $O(n^2)$, en la práctica es eficiente y fue durante décadas un estándar de comparación en el VRPTW.

Pseudocódigo — Inserción secuencial (estilo Solomon).

Entrada: clientes U con ventanas $[e_i, l_i]$, demanda d_i ; capacidad Q ; tiempos/distancias; depósito D .

Salida: conjunto de rutas R factibles.

```

R <- VACIO ; U <- {1,...,n}
mientras U no vacío:
    r <- nueva_ruta_con_semilla(U)      # ej. cliente con menor l_i
    insertar_semilla_en(r); quitar_semilla_de(U)

    hubo_insercion <- verdadero
    mientras hubo_insercion:
        mejor <- NINGUNO ; costo_mejor <- +INF
        para cada i en U:
            para cada posición (u,v) contigua en r:
                if insertar i entre (u,v) es factible (capacidad/tiempo):
                    DELTA <- costo_incremental(r, i, u, v) + penalizaciones
                    if DELTA < costo_mejor:
                        mejor <- (i,u,v)
                        costo_mejor <- DELTA
        si mejor != NINGUNO:
            insertar(mejor.i, entre mejor.u y mejor.v, en r)
            actualizar_horarios_por_propagacion(r)
            U <- U \ {mejor.i}
        si mejor = NINGUNO:
            hubo_insercion <- falso

R <- R UNION {r}

```

(b) **Inserción paralela (Potvin & Rousseau).** El algoritmo de Potvin y Rousseau (Potvin y Rousseau, 1993) parte de la misma idea de insertar visitas en posiciones factibles, pero en lugar de completar rutas de manera secuencial, mantiene abiertas varias rutas al mismo tiempo. En cada iteración se considera el conjunto completo de rutas y visitas no asignadas, y se selecciona la inserción globalmente más ventajosa.

Este esquema permite distribuir más equilibradamente la carga de trabajo entre vehículos, evita la formación de rutas muy cortas o muy largas, y suele producir soluciones iniciales de mejor calidad que el enfoque secuencial, aunque a costa de un mayor esfuerzo computacional por iteración. Al igual que en el método de Solomon, se requiere actualizar los horarios después de cada inserción para mantener la factibilidad con respecto a las ventanas horarias.

Pseudocódigo — Inserción paralela (estilo Potvin–Rousseau).

Entrada: clientes U con ventanas $[e_i, l_i]$, demanda d_i ; capacidad Q ;
tiempos/distancias; deposito D .

Salida: conjunto de rutas R factibles.

inicializar un conjunto de rutas VACIAS R (o partir de semillas multiples)
 $U \leftarrow \{1, \dots, n\}$

mientras U no vacío:

 mejor \leftarrow NINGUNO ; costo_mejor \leftarrow +INF

 para cada ruta r en R (incluso r vacías):

 para cada i en U :

 para cada posición (u,v) en r (o crear r si esta vacía):

 if insertar i en r entre (u,v) es factible:

 DELTA \leftarrow costo_incremental(r, i, u, v) + penalizaciones

 if DELTA < costo_mejor:

 mejor \leftarrow (r, i, u, v)

 costo_mejor \leftarrow DELTA

 if mejor = NINGUNO:

 # no hay inserciones factibles en rutas existentes: abrir una nueva

$r_{nueva} \leftarrow$ ruta_con_semilla(U)

 insertar_semilla

$R \leftarrow R \cup \{r_{nueva}\}$

 else:

 insertar(mejor. i en mejor. r entre mejor. u y mejor. v)

 actualizar_horarios_por_propagacion(mejor. r)

$U \leftarrow U \setminus \{mejor.i\}$

Heurísticas de mejora de soluciones. Además de los métodos constructivos, existen heurísticas orientadas a **refinar soluciones iniciales** mediante la aplicación sistemática de operadores de intercambio. El objetivo es explorar el vecindario de la solución actual en busca de una reducción del costo total de las rutas, manteniendo siempre la factibilidad con respecto a capacidades, ventanas

temporales y demás restricciones (Gendreau y Potvin, 2010)

Dada una solución S , se define un conjunto de soluciones vecinas $N(S)$ que pueden alcanzarse mediante la aplicación de un movimiento local (por ejemplo, intercambiar dos visitas). La búsqueda local consiste en evaluar las soluciones de $N(S)$ y avanzar hacia la de menor costo hasta llegar a un *óptimo local*, es decir, un punto donde ningún vecino ofrece una mejora adicional (Laporte, 1992).

Operadores clásicos de mejora.

- **2-opt**: elimina dos aristas en una ruta y reconecta los segmentos en orden inverso. Propuesto originalmente para el TSP por Lin (1965) y ampliamente adoptado en VRP (Lin, 1965).
- **3-opt**: extensión de 2-opt que permite tres cortes y múltiples formas de reconexión, introducida por Lin & Kernighan (1973) (Lin y Kernighan, 1971).
- **Or-opt**: desplaza un bloque consecutivo de 1–3 clientes a otra posición, desarrollado por Or (1976) (Gendreau y Potvin, 2010).
- **Relocate / Swap**: movimientos básicos que trasladan o intercambian clientes entre rutas; son la base de numerosas implementaciones modernas (Toth y Vigo, 2014).
- **Cross-exchange**: intercambio simultáneo de segmentos entre dos rutas, estudiado por Potvin & Rousseau (1995) (Potvin y Rousseau, 1995).

Estrategias de búsqueda. La mejora puede aplicarse siguiendo distintos esquemas:

1. *Best improvement*: se evalúan todos los movimientos posibles en $N(S)$ y se aplica el que produzca la mayor reducción de costo.
2. *First improvement*: se aplica el primer movimiento que mejore la solución, lo que acelera la convergencia aunque no siempre alcanza la mejor mejora en cada iteración.
3. *Variable Neighborhood Descent (VND)*: combina múltiples vecindarios (2-opt, 3-opt, relocate, etc.) en secuencia; introducido por Mladenović & Hansen (1997) (Mladenović y Hansen, 1997), permite escapar de óptimos locales de un vecindario explotando otros.

Pseudocódigo — Búsqueda Local (LS) con First/Best Improvement.

Entrada: solución inicial S (factible); conjunto de vecindarios V
(p.ej., $V = \{2\text{-opt}, \text{relocate}, \text{swap}, \text{or-opt}\}$);
modo in $\{\text{FIRST_IMPROVEMENT}, \text{BEST_IMPROVEMENT}\}$.

Salida: solución S^* mejorada.

```
S* <- S
mejora <- verdadero
```

```

mientras mejora:
    mejora <- falso
    para cada vecindario N en V:
        mejor_mov <- NINGUNO
        mejor_delta <- 0
        para cada movimiento m en N(S*):           # generar candidatos factibles
            DELTA <- costo_incremental(S*, m)      # incluye penalizaciones si aplica
            if DELTA < mejor_delta:
                mejor_delta <- DELTA
                mejor_mov <- m
                if modo = FIRST_IMPROVEMENT:
                    aplicar(m, S*)
                    mejora <- verdadero
                    romper bucle de N (pasar al siguiente vecindario)
            if modo = BEST_IMPROVEMENT and mejor_mov != NINGUNO:
                aplicar(mejor_mov, S*)
                mejora <- verdadero
retornar S*

```

Ventajas y limitaciones. Estas heurísticas son rápidas, fáciles de implementar y, en muchas instancias, generan mejoras significativas sobre las soluciones constructivas iniciales. Sin embargo, al depender de la estructura del vecindario, tienden a *estancarse* en óptimos locales de baja calidad si se usan en forma aislada (Toth y Vigo, 2014).

Por este motivo, en la práctica se combinan con técnicas más potentes (metaheurísticas como *Tabu Search*, *Simulated Annealing* o *Guided Local Search*), que introducen mecanismos para escapar de óptimos locales y explorar de manera más amplia el espacio de soluciones (Gendreau y Potvin, 2010). En ese sentido, las heurísticas de mejora constituyen el núcleo básico de la mayoría de metaheurísticas modernas aplicadas al VRP.

Extensiones a flota heterogénea (HVRP). En el VRP con flota heterogénea, los vehículos disponibles no son idénticos, sino que difieren en atributos como capacidad de carga, costos fijos de utilización, costos variables por distancia o tiempo, e incluso restricciones de compatibilidad con ciertos clientes. Por ejemplo, un camión de gran capacidad puede tener un costo fijo elevado y estar restringido a calles principales, mientras que una furgoneta más pequeña puede acceder a zonas céntricas con menores costos fijos pero mayor costo variable por kilómetro recorrido.

Estas diferencias obligan a extender las heurísticas tradicionales de construcción para considerar la elección del tipo de vehículo como parte del proceso de inserción. En particular, el cálculo del *costo incremental* al insertar un cliente debe incorporar:

1. **Capacidad del vehículo:** verificar que la demanda acumulada de la ruta no supere la capacidad específica del vehículo seleccionado.

2. **Costos fijos:** si una ruta está vacía y se activa al asignarle el primer cliente, debe sumarse el costo fijo asociado a ese vehículo.
3. **Costos variables dependientes del tipo:** la distancia o tiempo recorrido pueden tener multiplicadores distintos según el vehículo (ej. consumo de combustible, tarifas de peaje).
4. **Compatibilidades:** algunos clientes solo pueden ser atendidos por ciertos vehículos debido a restricciones físicas (altura, peso, refrigeración, accesibilidad).

La literatura muestra que estas adaptaciones se integran naturalmente en los algoritmos de inserción secuencial y paralela. Por ejemplo, las reglas de Solomon pueden ampliarse considerando no solo la posición óptima de inserción del cliente, sino también el tipo de vehículo que minimiza el costo total. De forma análoga, la versión paralela de Potvin y Rousseau evalúa simultáneamente las posibles inserciones en distintas rutas y distintos vehículos, seleccionando la opción de menor costo global.

Trabajos como la revisión de (Baldacci y cols., 2007) presentan taxonomías completas de algoritmos exactos y heurísticos para HVRP, mientras que estudios específicos como los de Dullaert et al. analizan explícitamente la asignación vehículo–ruta bajo costos fijos diferenciados, mostrando que la decisión de cuándo activar un vehículo adicional es tan importante como la de cómo construir las rutas (Dullaert, Janssens, Sörensen, y Vernimmen, 2002).

Esquema de costo para HVRP (ilustrativo).

```

Para cada tipo de vehiculo t:
  if r(t) VACIA y la insercion activa r(t):
    añadir COSTO_FIJO[t]
    COSTO_t <- COSTO_DISTANCIA_t + COSTO_TIEMPO_t
              + penalizaciones_factibilidad
Elegir (t, posicion) con menor COSTO_t entre las factibles.

```

Estas extensiones permiten modelar escenarios más realistas de planificación de transporte, como los encontrados en empresas de logística urbana o distribución regional, donde conviven vehículos de distinta capacidad y costo. Aunque aumentan la complejidad de la heurística, mantienen un tiempo de cómputo bajo en comparación con métodos exactos, lo que las hace atractivas para aplicaciones *on-line* o en entornos donde se necesita replanificar con frecuencia.

2.3.3. Metaheurísticas clásicas y modernas

Para mejorar las soluciones heurísticas del VRP, se emplea un amplio repertorio de algoritmos de búsqueda estocástica capaces de escapar de óptimos locales. A continuación se resumen los enfoques más influyentes y su estado actual.

Simulated Annealing (SA). Introduce una “temperatura” que permite aceptar movimientos desfavorables y así explorar el espacio de manera más exhaustiva (Kirkpatrick, Gelatt, y Vecchi, 1983). Implementaciones paralelas han obtenido **gaps 2–5 %** respecto del óptimo en las instancias de 100 clientes de Solomon y escalan con éxito hasta 200 clientes (Chiang y Russell, 1996; Wiecek, 2011).

Tabu Search (TS). Mantiene una *tabu list* para evitar ciclos y guiar la búsqueda. El algoritmo de Gendreau, Hertz y Laporte (1996) sigue siendo referente para VRPTW y se ha extendido al HVRP y SDVRP (Gendreau, Hertz, y Laporte, 1994). TS híbridadas resuelven hoy instancias con más de 1000 clientes en minutos.

Local Search (LS) Parte de una solución inicial y aplica de forma iterativa operadores de vecindad *-2-opt, 3-opt, Or-opt, relocate, swap, cross-exchange*, entre otros– hasta alcanzar un óptimo local. Los trabajos seminales de Lin (1965) y Lin & Kernighan (1973) siguen siendo la base de la mayoría de heurísticas modernas para TSP y VRP (Lin, 1965; Lin y Kernighan, 1971).

Guided Local Search (GLS). GLS se superpone a cualquier algoritmo de búsqueda local tradicional para ayudarlo a escapar de óptimos locales. La idea consiste en *penalizar dinámicamente* los rasgos que caracterizan la solución actual, de forma que el próximo ciclo de búsqueda local explore regiones del espacio aún no visitadas. Google OR-Tools emplea GLS como metaheurística estándar y combina cientos de operadores de intercambio de gran vecindad (Google LLC, s.f.).

Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP). Construye soluciones mediante selección aleatoria sesgada y luego aplica búsqueda local; combinada con *path relinking* se usa en problemas bi-nivel y VRP 2-Echelon (Crainic, Mancini, Perboli, y Tadei, 2012).

Ant Colony Optimization (ACO). Emplea colonias de hormigas virtuales y feromonas; versiones mejoradas alcanzan $\text{gaps} < 3$ y suelen usarse como generadores de soluciones iniciales (Bullnheimer, Hartl, y Strauss, 1997).

Los métodos exactos garantizan la optimalidad sólo en instancias pequeñas (< 50 pedidos). En casos industriales de tamaño medio y grande, **las metaheurísticas dominan la práctica profesional**, equilibrando calidad y tiempo de cálculo. El capítulo siguiente mostrará cómo estas técnicas se adaptan y se combinan para resolver eficientemente el *Dial-a-Ride Problem*.

2.4. El *Dial-a-Ride Problem* (DARP)

El *Dial-a-Ride Problem* (DARP) modela la operación de servicios de transporte a demanda en los que los usuarios requieren ser recogidos en un origen y

llevados a un destino específico. A diferencia del VRP clásico, en el DARP se gestionan simultáneamente *pares* de nodos *pickup-delivery*, se introducen restricciones de calidad de servicio estrictas y, con frecuencia, se emplean vehículos con características diferenciadas. Su estudio resulta esencial para el STA-MIDES, donde cada solicitud corresponde a un traslado accesible con requerimientos temporales y de compatibilidad usuario-vehículo.

2.4.1. Definición formal

Siguiendo la formulación de tres índices presentada por (Cordeau y Laporte, 2007), el *Dial-a-Ride Problem*, DARP, se modela sobre un grafo dirigido $G = (V, A)$ con

$$V = \{0, 2n + 1\} \cup P \cup D,$$

donde los vértices 0 y $2n + 1$ son dos copias del depósito (salida y llegada, respectivamente). El conjunto de nodos de recogida es

$$P = \{1, \dots, n\},$$

mientras que

$$D = \{n + 1, \dots, 2n\}$$

contiene los nodos de entrega, de modo que cada petición se representa mediante el par $(i, n + i)$ con $i \in P$. A cada arco $(i, j) \in A$ se asocian un costo de recorrida c_{ij}^k (costo de recorrer la arista (i, j) por el vehículo k) y un tiempo de viaje t_{ij} .

Para cada vértice $i \in V$ se definen los parámetros:

- demanda q_i , con $q_0 = q_{2n+1} = 0$, $q_i > 0$ si $i \in P$ y $q_{n+i} = -q_i$;
- duración de servicio $d_i \geq 0$, donde $d_0 = d_{2n+1} = 0$;
- ventana temporal $[e_i, l_i]$.

Sea K el conjunto de vehículos. Cada vehículo $k \in K$ tiene capacidad Q_k y una duración máxima de ruta T_k . Se introducen variables binarias x_{ij}^k que valen 1 si el vehículo k recorre el arco (i, j) o 0 en caso contrario.

Además, para cada vehículo $k \in K$ y vértice $i \in V$ se consideran:

- u_i^k : instante en que el vehículo k inicia el servicio en i ;
- w_i^k : carga del vehículo k al abandonar i ;
- r_i^k : tiempo de viaje (*ride time*) vivido por el usuario correspondiente a la petición $(i, n + i)$.

Por último, L denota el tiempo de viaje (*ride time*) máximo admitido.

Función objetivo

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (2.1)$$

Restricciones

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in P \quad (2.2a)$$

$$\sum_{i \in V} x_{0i}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (2.2b)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i, 2n+1}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (2.2c)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij}^k - \sum_{j \in V} x_{n+i, j}^k = 0 \quad \forall i \in P, k \in K \quad (2.2d)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ji}^k - \sum_{j \in V} x_{ij}^k = 0 \quad \forall i \in P \cup D, k \in K \quad (2.2e)$$

$$u_j^k \geq (u_i^k + d_i + t_{ij})x_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (2.2f)$$

$$w_j^k \geq (w_i^k + q_j)x_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (2.2g)$$

$$r_i^k \geq u_{n+i}^k - (u_i^k + d_i) \quad \forall i \in P, k \in K \quad (2.2h)$$

$$u_{2n+1}^k - u_0^k \leq T_k \quad \forall k \in K \quad (2.2i)$$

$$e_i \leq u_i^k \leq l_i \quad \forall i \in V, k \in K \quad (2.2j)$$

$$t_{i, n+i} \leq r_i^k \leq L \quad \forall i \in P, k \in K \quad (2.2k)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq w_i^k \leq \min\{Q_k, Q_k + q_i\} \quad \forall i \in V, k \in K \quad (2.2l)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, u_i^k, w_i^k, r_i^k \geq 0 \quad (2.2m)$$

La función objetivo (2.1) minimiza el costo total de recorrido. Las restricciones (2.2a) y (2.2d) garantizan que cada solicitud se atiende exactamente una vez, mientras que (2.2b), (2.2c) y fuerzan la salida y retorno de cada vehículo al depósito. Las expresiones (2.2f)–(2.2h) definen, respectivamente, los inicios de los tiempos de servicio, la carga de los vehículos y los tiempos de viajes de los usuarios, mientras que las restricciones (2.2i)–(2.2l) garantizan que esto último sea factible.

2.4.2. Restricciones adicionales

Antes de describir otras restricciones a las ya mencionadas, conviene remarcar que estas surge de exigencias operativas o de calidad de servicio que complementan la formulación base del DARP. Su inclusión permite modelar con mayor fidelidad las condiciones reales bajo las que operan los prestadores de transporte asistencial.

Ventanas de tiempo blandas. Además de las ventanas duras $[e_i, l_i]$ ya introducidas en la formulación formal, en la práctica es habitual permitir desviaciones controladas. Estas se modelan penalizando pero no prohibiendo los arribos fuera de la ventana. De esta forma se amplía el espacio de soluciones y se representa mejor la flexibilidad operativa.

Compatibilidad vehículo–usuario. Cada solicitud solo puede ser atendida por vehículos de un subconjunto $\Gamma \subseteq K$ que cubren sus requerimientos (por ejemplo, plataforma elevadora o personal sanitario). Se impone

$$x_{ij}^k = 0 \quad \forall k \notin \Gamma, \quad \forall (i, j) \in A$$

2.4.3. Variantes del DARP

Estático vs. dinámico. En el *DARP estático* toda la demanda se conoce antes de la optimización; es apropiado para rutas planificadas con antelación (p. ej. transporte escolar). El *DARP dinámico* introduce nuevas solicitudes en línea; la solución se recalcula o ajusta periódicamente (Cordeau y Laporte, 2003). Plataformas de ride-sharing o ambulancias urbanas operan bajo esquemas dinámicos.

DARP grupal. Permite que varios pasajeros con origen y destino idénticos se agrupen en un mismo “pedido”, reduciendo el número de paradas. Esto es frecuente en transporte corporativo de empleados o en traslados de pacientes de un mismo centro geriátrico (Parragh y cols., 2008).

DARP con accesibilidad. Se extiende el modelo para diferenciar capacidades: *sillas de ruedas*, *asientos convencionales* y *acompañantes*. Cada vehículo k posee un vector de capacidades $(Q_k^{\text{SR}}, Q_k^{\text{AC}}, Q_k^{\text{SC}})$ y cada usuario i consume un perfil $(q_i^{\text{SR}}, q_i^{\text{AC}}, q_i^{\text{SC}})$. Esta variante captura los requisitos del STA-MIDES, donde una misma camioneta puede transportar, por ejemplo, dos pasajeros con sillas de ruedas y tres pasajeros sentados, con eventuales acompañantes.

El DARP, con su diversidad de restricciones y variantes, se configura como el marco natural para modelar el servicio de transporte accesible. En la próxima sección se abordarán algoritmos y herramientas específicas que permiten resolver este problema a escala operativa.

2.5. Algoritmos y enfoques utilizados en la práctica

El éxito de un sistema de planificación operacional depende, en gran medida, de las herramientas de software que implementan los algoritmos de optimización y de cálculo de distancias. En la industria coexiste un ecosistema amplio que va desde solvers comerciales de alto costo hasta librerías de código abierto con comunidades muy activas. Esta sección reseña los paquetes más utilizados hoy en día y justifica la selección de componentes para el STA-MIDES.

2.5.1. Librerías y *solvers* de optimización

OR-Tools (Google). OR-Tools es una suite de optimización publicada bajo licencia Apache 2.0 que incluye modelos de VRP, DARP y variantes con recogida y entrega, ventanas de tiempo y flota heterogénea (Google LLC, s.f.). Incorpora metaheurísticas de *Guided Local Search*, Tabu y *Large Neighborhood Search*, así como integraciones con el solver CP-SAT para programación entera. Su API en Python y C++ facilita la adopción por equipos mixtos de investigación y desarrollo.

PuLP. PuLP es un modelador de programación lineal entero escrito en Python y distribuido bajo licencia MIT. Permite construir modelos algebraicos y delegar la resolución a back-ends como CBC, Gurobi o CPLEX (Mitchell, 2011). Si bien no provee algoritmos VRP “out-of-the-box”, resulta útil para prototipos de pequeña escala y para integrar restricciones personalizadas que escapan a los modelos integrados de OR-Tools.

Otros solvers relevantes. Herramientas comerciales — Gurobi, CPLEX, Xpress — ofrecen desempeño sobresaliente en problemas de pequeña y mediana escala gracias a técnicas avanzadas de *branch & cut*. En el ámbito *open source*, OptaPlanner (Java/Kotlin) y Jsprit (Java) proveen metaheurísticas configurables para VRP, mientras que VRPy (Python) implementa modelos de *column generation*. Estas opciones pueden combinarse con PuLP o bien actuar como reemplazo parcial de OR-Tools cuando se requiere un lenguaje específico (p. ej. ecosistema Java).

Estrategias de construcción e intensificación en OR-Tools

Como se utilizará OR-Tools como solver, se documentan aquí las principales estrategias de solución inicial y metaheurísticas de mejora disponibles, que serán evaluadas empíricamente más adelante.

Estrategias de Solución Inicial (*First Solution Strategy*). Estas heurísticas construyen una ruta factible inicial, que luego puede mejorarse con búsqueda local:

- **PATH_CHEAPEST_ARC:** expande secuencias eligiendo siempre el arco de menor costo disponible, respetando factibilidad.
- **PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION:** inserta en paralelo los clientes en las mejores posiciones factibles (coste incremental mínimo) sobre múltiples rutas.
- **LOCAL_CHEAPEST_INSERTION:** variante de inserción que prioriza la mejor posición local para cada cliente.
- **SAVINGS:** heurística tipo Clarke–Wright que fusiona rutas en función de los ahorros de distancia/tiempo.

- `GLOBAL_CHEAPEST_ARC` (y afines): elige globalmente el arco más barato factible en cada paso.

Metaheurísticas de Búsqueda Local (*Local Search Metaheuristic*). Estas técnicas intensifican la solución aplicando operadores de vecindad (relocate, swap, 2-opt, or-opt, etc.; cf. §2.3.2):

- `GUIDED_LOCAL_SEARCH`: penaliza rasgos recurrentes para escapar de óptimos locales (§2.3.3).
- `SIMULATED_ANNEALING`: acepta con probabilidad controlada movimientos que empeoran temporalmente la solución.
- `TABU_SEARCH`: evita ciclos mediante una lista tabu que restringe movimientos recientemente explorados.
- `AUTOMATIC`: el solver selecciona automáticamente .

2.5.2. Motores de cálculo de rutas y matrices

Para evaluar funciones objetivo y restricciones temporales, un solver VRP necesita matrices de tiempo y distancia confiables. Existen motores de ruteo *offline*—basados en grafos carreteros pre-procesados—y servicios *online* (APIs comerciales) que cobran por volumen de consultas.

OSRM. *Open Source Routing Machine* es un motor de ruteo muy veloz, implementado en C++ y liberado bajo licencia BSD 2-Clause. Emplea *Contraction Hierarchies* para responder, en milisegundos, rutas y matrices sobre datos de OpenStreetMap (*OSRM - Open Source Routing Machine, s.f.*). Es la opción predilecta para instalaciones on-premise que requieren alto rendimiento y bajo costo.

Valhalla. Valhalla, mantenido por Mapbox y la comunidad, es también C++/MIT y soporta distintos perfiles de tránsito, incluidos peatones, bicicletas y autos (*Valhalla, s.f.*). Aporta enrutamiento multimodal y reconocimiento de zonas de acceso restringido, lo que resulta valioso en entornos urbanos complejos.

Comparación con APIs comerciales. Servicios como Google Distance Matrix API o HERE Routing ofrecen cobertura global, datos de tráfico en tiempo real y mantenimiento simplificado, pero implican costos recurrentes y restricciones de cuota. Para el STA-MIDES—cuyas rutas se concentran en Uruguay—OSRM y Valhalla brindan autonomía y evitan dependencia de terceros, a costa de gestionar la infraestructura de servidores y la actualización de mapas OSM.

2.5.3. Comparacion

La evaluación de distintas arquitecturas de ruteo y optimización mostró que **OSRM + OR-Tools** ofrece la mejor relación costo-beneficio para el STA-MIDES. Destaca por:

- **Bajo costo total de propiedad (TCO).** Ambos componentes son *open source* con licencias permisivas (BSD 2-Clause y Apache 2.0), lo que elimina cuotas de uso y reduce riesgos de *vendor lock-in*.
- **Rendimiento sub-segundo.** En benchmarks internos con matrices de 1000 pares origen-destino en Montevideo, la combinación responde en menos de 1 s, superando a motores alternativos y a servicios SaaS bajo cuotas gratuitas.
- **Flexibilidad de modelado.** OR-Tools implementa nativamente restricciones de ventanas de tiempo, precedencias y capacidad heterogénea, mientras que OSRM puede actualizarse con nuevos perfiles OSM (p. ej. tránsito pesado) sin cambios en el solver.

En el siguiente capítulo se detalla cómo estas herramientas se integran en la arquitectura de software desarrollada para el STA-MIDES, así como las decisiones de diseño que garantizan su escalabilidad y mantenimiento.

2.6. Aplicaciones reales del DARP

El *Dial-a-Ride Problem* ha tenido aplicaciones prácticas en numerosos entornos de transporte asistencial, transporte accesible y movilidad compartida. A continuación se describen breves estudios de casos ilustrativos, resaltando las características del DARP que resultaron críticas para su implementación exitosa.

Access-A-Ride (Nueva York, EE. UU.). El servicio puerta a puerta Access-A-Ride (AAR), atiende millones de viajes anualmente, y representa un costo operativo significativo, cercano a los USD 475 millones ese año ([Citizens Budget Commission, 2020](#)). A partir de 2016–2019, se introdujeron mejoras, como reservas anticipadas, que permitieron incrementar el volumen de viajes en aproximadamente 31 % ([Citizens Budget Commission, 2020](#)). No se encontraron fuentes públicas que cuantifiquen reducciones en costos por kilómetro o mejoras operativas específicas derivadas de optimización.

London Dial-a-Ride (Reino Unido). Dial-a-Ride de Transport for London es un servicio gratuito puerta a puerta para personas con discapacidad que no pueden usar el transporte público convencional. Opera siete días a la semana dentro de un rango horario amplio y permite reservas anticipadas con cierto

nivel de flexibilidad, incluyendo viajes para el mismo día o con días de antelación limitados ([Transport for London, 2023](#)).

Estos casos demuestran que el DARP, respaldado por herramientas de planificación y buenas prácticas de datos, puede escalar desde sistemas piloto hasta sistemas utilizados en grandes ciudades.

2.7. Relevancia del DARP para el problema del STA-MIDES

El Servicio de Transporte Accesible (STA) del MIDES atiende diariamente a personas con distintos grados de dependencia funcional, quienes deben desplazarse entre sus domicilios y centros de salud, educación o rehabilitación. La operativa presenta tres rasgos distintivos que la alinean de forma directa con el *Dial-a-Ride Problem*:

2.7.1. Correspondencia entre requisitos operativos y modelo DARP

1. **Recogida y entrega vinculadas.** Cada solicitud incluye un par *pickup-delivery* con precedencia, requisito central del DARP ([Cordeau y Laporte, 2007](#)).
2. **Ventanas de tiempo heterogéneas.** Las citas médicas, turnos educativos y horarios laborales generan ventanas temporales disímiles: *hard* (rígidas) para consultas médicas y *soft* (flexibles) para talleres recreativos. Dicho esquema coincide con la formulación del DARP con ventanas horarias blandas.
3. **Flota heterogénea y requisitos de accesibilidad.** La flota del STA se compone de minibuses con 3–5 plazas para sillas de ruedas y asientos abatibles para acompañantes. Algunos usuarios requieren rampa eléctrica o anclajes ISO 10542. Esto se modela mediante conjuntos de compatibilidad Γ_i y vectores de capacidad (Q^{SR}, Q^{SC}, Q^{AC}) , conforme a la extensión de DARP con accesibilidad descrita en [2.4.3](#).

2.7.2. Impacto en la calidad de servicio

El marco DARP permite cuantificar métricas cruciales para el MIDES:

- **Tiempo máximo a bordo (L_i).** A efectos de confort, se fijó $L_i \leq 75$ min, valor alineado con estudios realizados en Nueva York ([Citizens Budget Commission, 2020](#)).
- **Kilómetros vacíos.** La coordinación de pares *pickup-delivery* reduce recorridos sin pasajeros, optimizando el uso de combustible y horas de conductor.

2.7.3. Adecuación de las herramientas seleccionadas

OR-Tools + OSRM. Como se detalló en la Sección 2.5, esta combinación satisface todas las restricciones del modelo STA: ventanas de tiempo, compatibilidad de vehículos, penalización de descartes (*drop penalty*) y límites de viaje.

Escalabilidad. Con una demanda estimada de 50 pares diarios y una flota de 3 vehículos, pruebas de carga indican tiempos de cómputo inferiores a 12 segundos, lo cuál es sumamente razonable para planificaciones diarias.

Flexibilidad de políticas. Cambios normativos (p. ej. reducción de L_i o prioridad a viajes hospitalarios) se traducen en parámetros del solver sin reescritura estructural del modelo.

2.7.4. Síntesis y transición

En suma, el DARP provee la abstracción exacta para capturar la complejidad operativa del STA-MIDES, mientras que la dupla OR-Tools/OSRM habilita su resolución en tiempos aptos para una operación diaria. Este encaje teórico-práctico justifica las decisiones de diseño expuestas en el capítulo siguiente, donde se describe la arquitectura de software y los flujos de datos que materializan esta planificación optimizada.

2.8. Conclusión del Capítulo

En este capítulo se expuso el marco teórico que sustenta el desarrollo del sistema de apoyo al Servicio de Transporte Accesible (STA) del MIDES. El recorrido comenzó con los fundamentos del *Traveling Salesman Problem* y su generalización al *Vehicle Routing Problem*, destacando las principales variantes y técnicas de resolución. Posteriormente, se profundizó en el *Dial-a-Ride Problem* (DARP), presentando su formulación matemática, restricciones de operación y variantes relevantes (estáticas, dinámicas y con accesibilidad).

A través de la revisión de heurísticas, metaheurísticas y enfoques de aprendizaje automático, se evidenció la necesidad de combinar métodos exactos y aproximados para equilibrar calidad de la solución y tiempos de cómputo. Asimismo, se analizaron herramientas de software —OR-Tools, PuLP, OSRM, Valhalla— cuya madurez y licencia abierta las convierten en componentes idóneos para la plataforma STA-MIDES. Finalmente, se revisaron casos de éxito en ciudades como Nueva York, Londres y Hamburgo, demostrando la pertinencia práctica del DARP para mejorar la eficiencia y la calidad de servicio en transporte accesible.

El marco teórico aporta tres beneficios clave:

1. **Fundamentación de diseño.** Provee las bases para modelar correctamente las restricciones (ventanas de tiempo, compatibilidad vehículo-usuario, límite de viaje) y seleccionar algoritmos adecuados.

2. **Evaluación de herramientas.** Justifica la elección de tecnologías de código abierto que aseguran escalabilidad, mantenibilidad y autonomía institucional.
3. **Medición de impacto.** Define métricas (kilómetros recorridos, tiempo a bordo, puntualidad) que guiarán la validación experimental y la mejora continua del servicio.

En los capítulos siguientes se describen el diseño e implementación del sistema STA-MIDES. Se detallarán la arquitectura de software, los flujos de datos entre frontend, backend y motor de optimización, así como las decisiones tecnológicas que convierten las nociones teóricas aquí expuestas en una herramienta operativa capaz de mejorar la movilidad accesible en Uruguay.

Capítulo 3

Requerimientos del sistema

Antes de abordar el diseño e implementación de la solución, es fundamental establecer de forma clara y estructurada los requerimientos que el sistema debe cumplir. En este capítulo se presentan tanto los requerimientos funcionales, que describen las capacidades específicas que el sistema debe ofrecer para cubrir las necesidades del STA-MIDES, como los requerimientos no funcionales, que definen las características generales de calidad, seguridad, usabilidad y arquitectura esperadas de la solución.

Los requerimientos funcionales fueron definidos en base al relevamiento de procesos inicial, realizado junto a los responsables de logística del STA, y validaciones periódicas durante el desarrollo. Estos se agrupan según las entidades y procesos clave del sistema: operadores, usuarios, solicitudes, vehículos, choferes, lugares comunes y planificaciones.

Por su parte, los requerimientos no funcionales reflejan expectativas de carácter transversal sobre el sistema, tales como accesibilidad, seguridad, modularidad, persistencia y experiencia de usuario. Su cumplimiento es esencial para garantizar una solución sólida, escalable y mantenible en el tiempo (ver también [Capítulo 5](#) para detalles de implementación que aseguran estos objetivos).

3.1. Requerimientos funcionales

RF1 - Gestión de operadores

- 1.1 **Registro de operadores.** El sistema debe permitir registrar nuevos operadores, almacenando el nombre de usuario y contraseña de los mismos. Los nuevos operadores se validan mediante correo electrónico.
- 1.2 **Autenticación de operadores.** Los operadores registrados se autentican contra la base de datos, con nombre de usuario y contraseña, para poder hacer uso de las demás funcionalidades.
- 1.3 **Recuperación de contraseña.** Los operadores pueden recuperar su contraseña, mediante correo electrónico, sin haberse autenticado en el sistema.

RF2 - Gestión de usuarios

- 2.1 **CRUD de usuarios.** El sistema debe permitir la creación, edición, listado y eliminación de usuarios. De cada usuario se registrará: nombre, apellido y documento, de forma obligatoria, así como dirección, características (si usa silla de ruedas y/o requiere rampa eléctrica) y observaciones, de forma opcional.

RF3 - Gestión de solicitudes

- 3.1 **Registro de solicitudes de traslado.** El sistema debe permitir registrar nuevas solicitudes de traslado. Estarán asociadas a un usuario previamente registrado y de este se obtendrán nombre, apellido y cédula.
- 3.2 **Configuración del tipo de viaje.** Se debe poder seleccionar entre viaje de ida y vuelta, solo ida o solo vuelta. El primero contará con tres ubicaciones como mínimo, mientras que los otros dos tipos siempre tendrán solo dos ubicaciones.
- 3.3 **Ingreso de direcciones.** Se solicitará el ingreso de direcciones, una asociada a cada ubicación, según el tipo de viaje elegido. Por defecto, se seleccionará la dirección del usuario asociado como origen, destino o ambas, según el tipo de viaje.
- 3.4 **Horarios.** Para cada ubicación que se visite en el viaje se solicitará una hora de llegada y/o una hora de partida. Además, se indicará un tipo de parada, el cual debe seleccionarse de una lista predefinida por STAMIDES.
- 3.5 **Paradas intermedias.** En los viajes de ida y vuelta, el sistema debe permitir agregar una o más paradas intermedias, con dirección, horario de llegada y salida, y tipo de parada.
- 3.6 **Campos adicionales.** Se debe permitir indicar si el viaje es prioritario, si el usuario lleva acompañante, y registrar observaciones.

RF4 - Georreferenciación de ubicaciones

- 4.1 **Geocodificación de direcciones.** El sistema debe permitir la geocodificación de direcciones, pasando de un texto libre a un par de coordenadas.
- 4.2 **Visualización de ubicaciones en mapas.** El sistema debe mostrar las ubicaciones obtenidas en la geocodificación en mapas, para permitir al usuario validar la correcta obtención de coordenadas.
- 4.3 **Geolocalización manual de direcciones.** El sistema debe permitir la selección manual de un punto en el mapa como ubicación para una dirección, solicitando el texto de la misma en el momento de la elección y guardando las coordenadas correspondientes al punto elegido.

RF5 - Gestión de choferes

- 5.1 **CRUD de choferes.** El sistema debe permitir la creación, edición, listado, activación y eliminación de choferes. Se registrarán nombre, apellido, documento y teléfono.

RF6 - Gestión de vehículos

- 6.1 **CRUD de vehículos.** El sistema debe permitir la creación, edición, listado, activación y eliminación de vehículos. Se registrarán matrícula, capacidades (común y para silla de ruedas) y características.

RF7 - Gestión de lugares comunes

- 7.1 **CRUD de lugares comunes.** El sistema debe permitir la creación, edición, listado, activación y eliminación de lugares comunes. Se registrarán nombre, dirección y observaciones.

RF8 - Gestión de planificaciones

- 8.1 **CRUD de planificaciones.** El sistema debe permitir la creación, listado, visualización y eliminación de planificaciones correspondientes a un día específico.
- 8.2 **Visualización de solicitudes.** Durante la creación de una planificación, se deben mostrar en el mapa y en un listado todos las solicitudes correspondientes al día seleccionado.
- 8.3 **Selección de pedidos.** El operador debe poder seleccionar qué solicitudes serán incluidas en la planificación mediante una casilla de verificación.
- 8.4 **Definición de turnos.** La planificación debe contar con al menos dos turnos, pudiéndose agregar más. Para cada turno se deben definir su horario de inicio y fin, y los vehículos disponibles.
- 8.5 **Asignación de vehículos.** Para cada vehículo asignado a un turno, se debe seleccionar un lugar de salida (desde la lista de lugares comunes registrados) y un chofer (desde la lista de choferes registrados).
- 8.6 **Generación de rutas optimizadas.** Una vez configurada la planificación, el sistema debe permitir su envío al optimizador, para generar las rutas correspondientes.
- 8.7 **Visualización de rutas.** Las rutas generadas deben mostrarse sobre el mapa, incluyendo sus lugares comunes (inicio y fin) y las paradas intermedias, asociadas a las solicitudes.
- 8.8 **Generación de reportes.** Tras completar la optimización de una planificación, el sistema debe permitir generar un reporte con la información resultante, siguiendo el formato del generado por la herramienta utilizada actualmente por el STA-MIDES.

3.2. Requerimientos no funcionales

1. **RNF1: Accesibilidad web.** El sistema debe ser accesible desde navegadores modernos, sin necesidad de instalación adicional ni componentes externos.
2. **RNF2: Seguridad.** Todas las operaciones deben estar autenticadas mediante tokens JWT.
3. **RNF3: Persistencia.** La información debe almacenarse de forma confiable en una base de datos PostgreSQL, permitiendo su posterior consulta, edición y auditoría.
4. **RNF4: Modularidad.** La arquitectura del sistema debe estar dividida en frontend y backend como módulos desacoplados, para facilitar su mantenimiento, despliegue y evolución tecnológica.
5. **RNF5: Usabilidad.** La interfaz debe ser intuitiva, clara y de rápida respuesta, priorizando siempre la experiencia del operador.
6. **RNF6: Interactividad con mapas.** El sistema debe brindar una experiencia fluida al trabajar con mapas, incluyendo la visualización de rutas, selección de ubicaciones y validación de coordenadas, sin retrasos perceptibles para el usuario.

Capítulo 4

Metodología de trabajo

Este capítulo describe la metodología adoptada para la organización y ejecución del trabajo a lo largo del proyecto. Se detallan las prácticas de desarrollo utilizadas, las herramientas de planificación y control de versiones implementadas, así como la dinámica de coordinación tanto interna como con el cliente y los tutores académicos.

4.1. Enfoque general

Durante el desarrollo del proyecto se adoptó una metodología ágil, adaptada a las características del equipo y del contexto particular del Proyecto de Grado. El enfoque se centró en el desarrollo incremental de funcionalidades, con planificación flexible y validación continua por parte del cliente, en línea con los principios de *Agile Software Development* (Beck et al., 2001).

4.2. Planificación y gestión

Se trabajó en sprints que contaban con un *backlog* de funcionalidades, organizadas y priorizadas en función del estado del sistema y de las necesidades expresadas por el equipo del STA. La planificación de los sprints y la gestión de tareas se realizó utilizando la herramienta Jira (*Jira Software*, 2025), donde se creaban tarjetas individuales para cada funcionalidad o corrección, agrupadas por entregas parciales.

4.3. Dinámica de reuniones

La frecuencia de las reuniones internas del equipo varió a lo largo del proyecto. En algunos períodos se mantuvieron reuniones semanales de seguimiento, mientras que en otros se ajustaron según la carga de trabajo o la necesidad de coordinación. Además, se organizaron reuniones mensuales o bimensuales con

los integrantes del STA, con el objetivo de presentar avances funcionales, validar decisiones de diseño y recoger feedback para orientar las siguientes etapas.

4.4. Control de versiones

El control de versiones se llevó a cabo utilizando Git ([Torvalds, 2025](#)), manteniendo un esquema de ramas por funcionalidad (`feature/`) o corrección de errores (`bugfix/`). Cada rama se desarrollaba de forma aislada y se eliminaba al ser integrada mediante `merge` a la rama `develop` correspondiente al componente en cuestión (frontend, backend, etc.).

4.5. Interacción con tutores académicos

En cuanto a la coordinación con los tutores académicos, las reuniones fueron puntuales y se utilizaron en momentos clave del proyecto, como la definición inicial, la resolución de dificultades con el cliente y el cierre del desarrollo. Esta dinámica permitió al equipo mantener autonomía en el trabajo técnico, recurriendo a los tutores para validar decisiones críticas o resolver situaciones específicas.

Capítulo 5

Diseño de la solución

Esta sección describe el diseño general del sistema desarrollado en el marco del Proyecto de Grado. Se presenta su arquitectura general, el modelo de dominio utilizado y las decisiones de diseño e implementación tomadas para satisfacer los requerimientos definidos previamente. El enfoque adoptado busca asegurar la modularidad, mantenibilidad y una experiencia de usuario fluida y robusta. Se presentan también dos flujos principales de uso del sistema, mostrando funcionalidades clave de este y cómo interactúan los distintos componentes para implementarlas.

5.1. Arquitectura general

El sistema fue diseñado con una arquitectura modular basada en cuatro componentes principales: frontend y backend de la aplicación web, motor de optimización y base de datos. Esta separación permite una mayor escalabilidad y facilita las tareas de mantenimiento, evolución y prueba de cada parte de forma independiente.

- **Frontend:** desarrollado en React ([Meta, s.f.](#)) y Vue ([et al., s.f.](#)), constituye la interfaz de usuario utilizada por los operadores. Se encarga de la interacción visual, la validación inicial de formularios y la comunicación con el backend a través de una API REST ([Fielding, 2000](#)). Además, se comunica directamente con el motor de optimización para enviar los datos de planificación (solicitudes, vehículos, turnos) y recibir las rutas optimizadas. Destaca por su integración con mapas interactivos, formularios dinámicos y la visualización gráfica de las rutas generadas.
- **Backend:** implementado con FastAPI ([Ramírez, s.f.](#)) en Python, expone las operaciones necesarias para interactuar con la base de datos y realizar tareas administrativas (gestión de usuarios, solicitudes, choferes, vehículos, planificaciones, operadores, camionetas). Además, valida credenciales de

acceso mediante JWT (*JSON Web Tokens (JWT), s.f.*) y mantiene la integridad del modelo de datos.

- **Motor de optimización:** implementado en Java, este componente recibe los datos de planificación (solicitudes, camionetas, lugares comunes) y se encarga de resolver el problema de ruteo. Se comunica con el servicio OSRM (Open Source Routing Machine) (*OSRM - Open Source Routing Machine, s.f.*) para obtener matrices de costo y geometrías de rutas, y utiliza la librería OR-Tools de Google (*Google, 2025*) para resolver el problema de optimización de rutas. Una vez optimizadas, las rutas son enviadas como respuesta al frontend para su visualización.
- **Base de datos:** se utilizó PostgreSQL (*PostgreSQL Global Development Group, 2025*) como sistema gestor, modelando entidades clave como usuarios, solicitudes, rutas y planificaciones. Se buscó mantener consistencia referencial y soporte para consultas complejas mediante relaciones bien definidas.
- **Servicio de geocodificación:** el sistema hace uso de un geocodificador externo para convertir direcciones escritas en texto a coordenadas geográficas. Este servicio es invocado directamente desde el frontend en el momento de crear o editar usuarios, solicitudes y lugares comunes. Su respuesta permite validar visualmente las ubicaciones en el mapa e incorporar las coordenadas en el proceso de planificación y optimización.

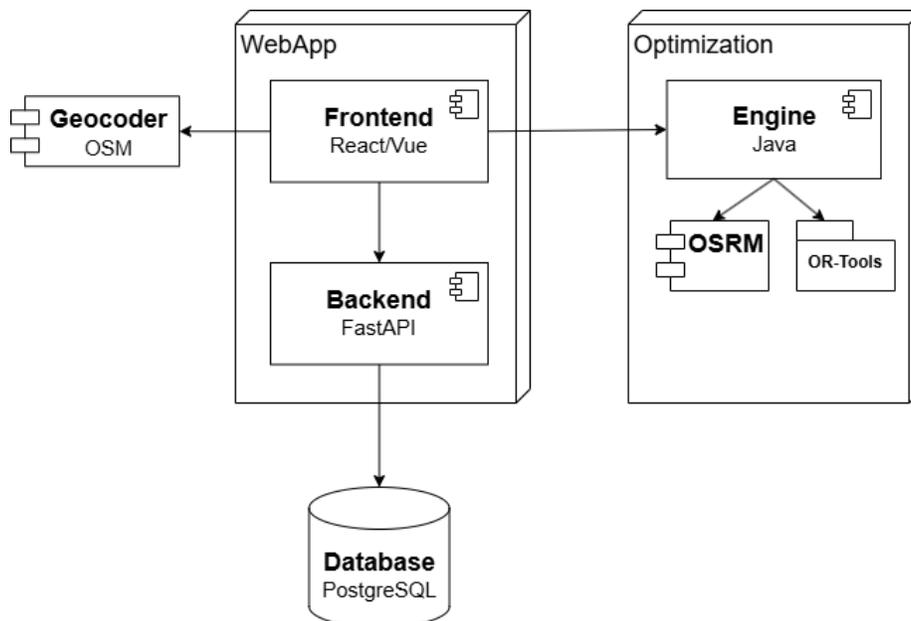


Figura 5.1: Arquitectura general del sistema

La comunicación entre los componentes se realiza mediante peticiones HTTP con datos en formato JSON. El frontend se comunica directamente tanto con el backend como con el motor de optimización.

Mientras que el backend gestiona todas las operaciones relacionadas con los datos persistentes y la administración general del sistema, el motor de optimización se invoca directamente desde el frontend en el momento de generar rutas a partir de una planificación.

Esta arquitectura permite una clara separación de responsabilidades y facilita la evolución independiente del módulo de optimización, que puede ser tratado como un servicio autónomo.

5.2. Decisiones tecnológicas

A lo largo del proyecto se debieron tomar diversas decisiones tecnológicas, tanto en lo referente a lenguajes de programación como a herramientas y bibliotecas utilizadas. Estas decisiones se basaron en criterios técnicos, experiencia previa del equipo y restricciones impuestas por el cliente.

5.2.1. Frontend

En el desarrollo del frontend se optó por React ([Meta, s.f.](#)) como framework principal debido a su flexibilidad, documentación y la experiencia del equipo en proyectos previos. Sin embargo, una parte del sistema debió desarrollarse utilizando Vue ([et al., s.f.](#)), dado que el equipo técnico de MIDES ya contaba con experiencia previa en dicha tecnología y solicitó utilizar esa parte de su stack tecnológico para facilitar el soporte futuro.

5.2.2. Backend

Para el desarrollo del backend se evaluaron inicialmente opciones como Django (*Django – The Web framework for perfectionists with deadlines, s.f.*) (Python) y ASP.NET (*ASP.NET, s.f.*) (C#), ambos frameworks robustos y ampliamente utilizados. Sin embargo, fueron descartados por considerarse demasiado pesados en relación al alcance del sistema, que requería principalmente una API REST ([Fielding, 2000](#)) liviana, rápida de desarrollar y fácil de mantener.

Se compararon entonces dos opciones más ligeras dentro del ecosistema Python: Flask ([Ronacher, s.f.](#)) y FastAPI ([Ramírez, s.f.](#)). La elección se inclinó por FastAPI debido a algunos detalles técnicos, como que tiene validación automática de datos mediante tipado y permite la generación automática de documentación interactiva a través de Swagger (*Swagger – Open Source Tools for APIs, s.f.*). Esto último resultó especialmente útil para separar el trabajo en las etapas tempranas del proyecto, ya que el encargado del backend podía probar los endpoints directamente cuando el frontend aún no era funcional.

5.2.3. Base de datos

La elección de PostgreSQL ([PostgreSQL Global Development Group, 2025](#)) se basó principalmente en dos factores: su licencia abierta y la experiencia del equipo con ese gestor de bases de datos. Además, cuenta con la extensión PostGIS ([PostGIS – Spatial and Geographic Objects for PostgreSQL, s.f.](#)), la cual es robusta y sencilla para el manejo de datos de información geográfica, y es ampliamente conocida por el equipo.

5.2.4. Geocodificador y mapas

Inicialmente se consideró la utilización de ArcGIS ([ArcGIS – Esri’s Mapping and Analytics Platform, s.f.](#)) para la visualización de mapas, debido a su potencia, versatilidad y la experiencia del equipo. No obstante, esta opción fue descartada luego de una instancia de validación con el cliente, donde este se mostró ciertamente disconforme con la interfaz. Se decidió entonces utilizar Leaflet ([Leaflet – An open-source JavaScript library for interactive maps, s.f.](#)), una biblioteca de código abierto más liviana y sencilla, que cumplía adecuadamente con los requerimientos funcionales y no funcionales definidos.

También se evaluó el uso del geocodificador proporcionado por MIDES, pero fue descartado por dos motivos principales: no resuelve direcciones a partir de texto libre, y su integración era significativamente más compleja en comparación con otros servicios comerciales de licencia abierta. Se optó entonces por Nominatim ([Nominatim – Search tool for OpenStreetMap data, s.f.](#)), motor de búsqueda de OpenStreetMap. Esta herramienta ofrece un servicio de geocodificación de texto libre muy sencilla de utilizar y que, luego de varias pruebas, demostró robustez suficiente.

5.2.5. Motor de optimización

subsectionMotor de optimización

Para la resolución del problema de ruteo, se analizaron distintas alternativas. En un principio se consideró utilizar la biblioteca PuLP ([PuLP – A Python library for linear optimization, s.f.](#)), especializada en programación lineal, pero se optó finalmente por Google OR-Tools ([Google, 2025](#)), que ofrece soporte específico para problemas de ruteo con restricciones y algoritmos de optimización avanzados, y que además cuenta con buena documentación y una comunidad activa.

Asimismo, se evaluó la posibilidad de implementar desde cero un algoritmo propio, pero dicha opción fue descartada por exceder el alcance del proyecto y por la existencia de soluciones maduras, bien documentadas y fáciles de integrar, como OR-Tools ([Google, 2025](#)).

5.3. Modelado del dominio

El modelo de dominio fue diseñado con un enfoque relacional, orientado a representar de manera estructurada las entidades involucradas en el problema y sus relaciones. Este modelo sirvió como base para la construcción de la base de datos y para organizar la lógica de negocio en el backend.

A continuación, se presentan las principales entidades y sus características.

Operadores Representan a las personas que interactúan con el sistema como operadores. Se almacena su correo electrónico, contraseña cifrada, nombre y rol (administrador o chofer). Si bien se dejó previsto el uso de roles diferenciados, actualmente el programa no realiza ninguna distinción funcional basada en el rol del usuario. El sistema también permite gestionar invitaciones para nuevos operadores y procesos de recuperación de contraseña mediante correo electrónico.

Usuarios Corresponden a los usuarios finales del servicio de traslado, es decir, a los usuarios del STA del MIDES. Se registra su documento, nombre, apellido, dirección, coordenadas geográficas, medios de contacto y observaciones. Adicionalmente, pueden estar asociados a una lista de características particulares, como que utilizan silla de ruedas.

Solicitudes y Paradas Una solicitud representa un pedido de traslado realizado por un usuario. Se indica si lleva acompañante, su prioridad, tipo de traslado (ida, vuelta o ambos), estado (pendiente, asignado, rechazado) y fecha programada. Cada solicitud contiene una o más paradas, las cuales definen una dirección, ventanas horarias y tipo de parada (este dato se elige de una lista predefinida por el STA).

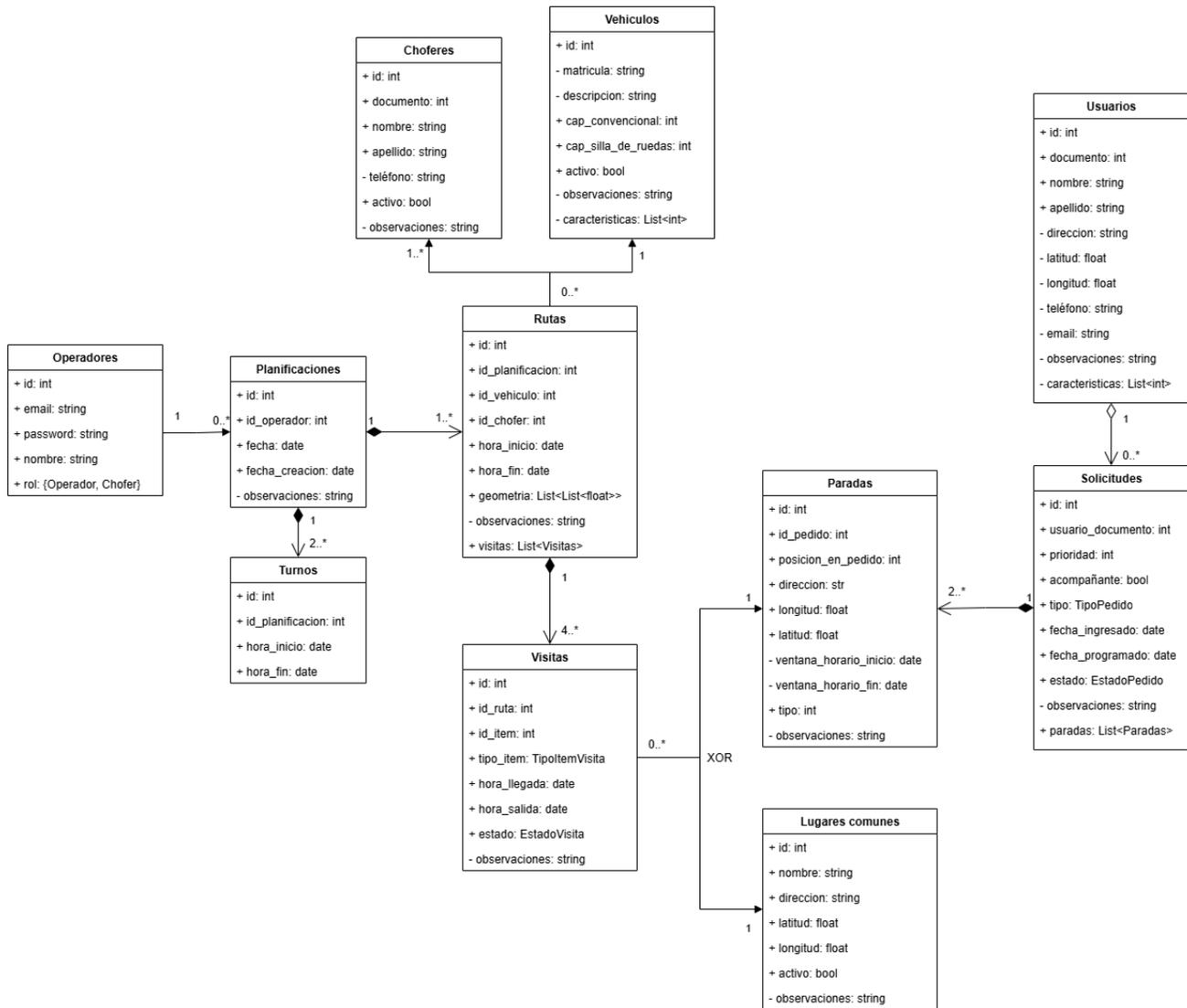


Figura 5.2: Modelo de dominio

Choferes y Camionetas Ambos son recursos del sistema utilizados en las rutas. De los choferes se registra nombre, documento, teléfono y estado (activo/inactivo). Las camionetas incluyen matrícula, capacidades (convencional y para silla de ruedas), observaciones, estado de actividad y una lista de características técnicas (las mismas que puede tener un usuario).

Lugares comunes Son ubicaciones fijas como estacionamientos, depósitos u oficinas institucionales, que serán utilizadas por el STA como punto de inicio y fin de las rutas, así como lugares de cambio de chofer. Se registran por su nombre, dirección, coordenadas y observaciones.

Rutas Representan el recorrido que debe realizar un vehículo durante una planificación. Está compuesta por una secuencia de visitas ordenadas y una geometría asociada que describe el trazado completo. Cada ruta está vinculada a una planificación específica, a un vehículo y a uno o más choferes.

Visitas Representan cada parada dentro de una ruta. Pueden estar asociadas a una solicitud o a un lugar común. Incluyen hora estimada de llegada y salida, estado (pendiente, realizada, cancelada) y observaciones.

Planificaciones y Turnos Una planificación representa el conjunto de rutas organizadas para un día determinado. Contiene uno o más turnos, definidos por su horario de inicio y fin. El horario de una ruta puede atravesar varios turnos, manteniendo siempre la misma camioneta, pero pudiendo tener un chofer diferente por turno.

5.4. Flujos principales de uso

A continuación se describen dos flujos representativos del funcionamiento del sistema. Estos escenarios permiten visualizar la interacción entre los distintos componentes (frontend, backend y motor de optimización) y los pasos involucrados para completar tareas clave.

5.4.1. Creación de una solicitud de traslado

Este flujo representa el proceso que sigue un operador para registrar una solicitud de traslado asociada a un usuario.

1. El operador se loguea en el sistema con usuario y contraseña.
2. Accede directamente al listado de usuarios, donde podrá seleccionar uno de la lista o buscar uno.
3. Presiona el botón con un símbolo + junto al usuario al cual le quiere crear la solicitud.
4. Se cargará el formulario de creación de solicitud, donde ya estarán cargados los datos del usuario.
5. Elige la fecha de la solicitud desde un selector de fechas y un tipo de viaje: *ida y vuelta, solo ida o solo vuelta.*

6. Según el tipo de viaje que elija, se le desplegarán las direcciones, horas de llegada y tipos de parada que debe rellenar.
7. Para cada ubicación, puede:
 - Ingresar la dirección manualmente y geocodificarla a coordenadas.
 - Seleccionar manualmente la ubicación en el mapa e ingresar el texto de la dirección.
8. Especifica la hora estimada de llegada y salida de cada caso que corresponda, así como el tipo de parada (de una lista predefinida).
9. Indica si el traslado es prioritario, si el cliente lleva acompañante, y puede añadir observaciones.
10. Valida visualmente todas las ubicaciones en el mapa interactivo.
11. Envía el formulario, que es validado en el frontend y luego enviado al backend.
12. El backend guarda los datos en la base de datos y retorna confirmación de éxito.

5.4.2. Creación y ruteo de una planificación

Este flujo describe el proceso completo de armar y optimizar una planificación para un día operativo.

1. El operador oprime el botón de *Nueva planificación* desde el listado de planificaciones.
2. Se despliega la pantalla de creación de planificación, donde el sistema carga automáticamente todas las solicitudes de traslado registradas para ese día, mostrándolas en un listado y sobre el mapa.
3. El operador selecciona (mediante checkboxes) qué solicitudes incluirá en la planificación.
4. Define los turnos: al menos dos, pudiendo agregar más. Para cada turno:
 - Ingresar el horario de inicio y fin.
 - Selecciona los vehículos disponibles.
 - Para cada vehículo, asigna un lugar de salida (desde lugares comunes) y un chofer.
5. Una vez configurado todo, presiona *Planificar*.
6. El frontend arma un JSON con las solicitudes seleccionadas, vehículos, turnos y lugares comunes, y lo envía directamente al motor de optimización.

7. El motor transforma los datos al formato de entrada de OSRM, solicita la matriz de costos y ejecuta el algoritmo de ruteo usando OR-Tools.
8. Calculadas las asignaciones, solicita a OSRM las geometrías completas de cada ruta.
9. El motor retorna al frontend el listado de rutas optimizadas, con geometría, visitas, horarios estimados, vehículo y chofer.
10. El operador visualiza los resultados sobre el mapa, puede revisar cada ruta en detalle y, si todo está correcto, guardar la planificación.
11. Finalmente, tiene la opción de generar un reporte en PDF con la planificación y sus rutas.

Capítulo 6

Experimentación

6.1. Introducción

El desarrollo de un sistema de optimización para la planificación de rutas de transporte accesible requiere una validación empírica rigurosa que demuestre su viabilidad práctica y ventajas operativas. El sistema implementado integra las siguientes tecnologías: una interfaz web desarrollada en React, un backend en Python con FastAPI, un motor de optimización en Java con Spring Boot y matrices de costo calculadas mediante OSRM (Open Source Routing Machine). El componente central del sistema es el núcleo de optimización basado en Google OR-Tools, diseñado específicamente para resolver el Problema de Enrutamiento de Vehículos con Recogida y Entrega y Ventanas de Tiempo (VRPPDTW), el cual constituye el foco principal de la validación experimental de este capítulo.

Sin embargo, antes de poder evaluar el impacto del sistema en escenarios operativos reales, es fundamental determinar y justificar la configuración algorítmica más eficaz para las características específicas de este problema. El rendimiento de un solver como OR-Tools no depende únicamente del modelo matemático, sino también de la elección de las heurísticas que utiliza para encontrar y mejorar las soluciones. Por ello, el foco principal y punto de partida de este capítulo será un análisis comparativo exhaustivo para seleccionar la combinación óptima de estrategias de solución inicial y metaheurísticas de búsqueda local, estableciendo así una base sólida para las validaciones posteriores.

Una vez justificada la configuración del optimizador, el sistema se utilizará para generar planificaciones que serán analizadas a través de reportes en formato PDF, los cuales no solo facilitan la interpretación de los resultados en los distintos escenarios de prueba, sino que también constituyen la herramienta principal que utilizarán los operadores del sistema para gestionar las planificaciones generadas.

6.1.1. Objetivos del Capítulo

Este capítulo tiene como objetivo principal validar el rendimiento del sistema y su potencial para mejorar la eficiencia del servicio. Específicamente, se busca:

1. **Justificar las decisiones algorítmicas** mediante una comparación sistemática de las metaheurísticas de búsqueda local y las estrategias de construcción de solución inicial que ofrece OR-Tools, para identificar la combinación más eficiente en términos de calidad de solución y tiempo de cómputo.
2. **Cuantificar las mejoras operativas** en términos de distancia recorrida, tiempo de operación y utilización de vehículos, al comparar las planificaciones optimizadas con la operativa manual real.
3. **Validar la escalabilidad** del sistema ante incrementos significativos en la demanda y en la flota de vehículos.
4. **Demstrar la viabilidad práctica** del sistema, asegurando que los tiempos de cómputo sean adecuados para un entorno operativo dinámico.

6.1.2. Metodología Experimental

Para alcanzar estos objetivos, se ha diseñado una estrategia experimental que avanza desde la calibración del algoritmo hasta la validación en escenarios complejos, siguiendo cuatro fases principales:

Análisis Comparativo de Estrategias de Optimización

La primera fase se centra en la selección de la configuración más potente del solver. Dado que la calidad de la solución final depende tanto del punto de partida como del método para mejorarla, se realizará un análisis cruzado:

- **Estrategias de Solución Inicial (First Solution Strategy):** Se evaluarán sistemáticamente todos los métodos disponibles en OR-Tools para construir una primera ruta factible (por ejemplo, `PATH_CHEAPEST_ARC`, `SAVINGS`, `PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION`, entre otros).
- **Metaheurísticas de Búsqueda Local (Local Search Metaheuristic):** Para cada solución inicial, se aplicarán las diferentes metaheurísticas de mejora disponibles (por ejemplo, `GUIDED_LOCAL_SEARCH`, `SIMULATED_ANNEALING`, `TABU_SEARCH`).

Se ejecutará una batería de pruebas cruzando todas las combinaciones posibles sobre un conjunto de datos representativo, con un límite de tiempo de cómputo de 30 segundos. La combinación que ofrezca consistentemente las mejores soluciones (menor costo total, menos viajes no atendidos) en el menor tiempo será la seleccionada para todas las fases experimentales posteriores, justificando empíricamente la configuración del núcleo de optimización.

Validación de Casos Base por Tipo de Pedido

Antes de abordar la complejidad de una jornada operativa completa, se realizó una validación fundamental del modelo con casos de prueba mínimos y controlados. El objetivo de esta fase fue verificar el correcto funcionamiento del optimizador para cada uno de los tres tipos de solicitudes de transporte que el sistema debe gestionar:

- **Solo Ida (restricción en destino):** Viajes donde la restricción principal es la hora máxima de llegada a un destino. Por ejemplo, una cita médica a la que el usuario no puede llegar tarde.
- **Solo Vuelta (restricción en origen):** Viajes donde la restricción clave es la hora mínima de recogida. Por ejemplo, un usuario que finaliza una actividad y está disponible para ser recogido a partir de un momento determinado.
- **Ida y Vuelta (doble restricción):** Este tipo de solicitud agrupa múltiples **viajes** para un mismo usuario que deben realizarse en una secuencia específica. Aunque el nombre sugiere un par de viajes (ida y vuelta), el sistema está preparado para gestionar cadenas más largas. En el modelo, estos se tratan como **viajes vinculados** con una estricta relación de precedencia, donde cada tramo debe completarse antes de que el siguiente pueda comenzar.

Esta validación inicial fue crucial para asegurar que las restricciones de ventanas de tiempo, la precedencia de recogida y entrega, y la lógica de enrutamiento se comportaran como se esperaba en escenarios aislados. Además, permitió identificar y resolver una ambigüedad fundamental en la interpretación de las ventanas de tiempo, que se detallará más adelante, garantizando así la fiabilidad del modelo antes de su aplicación a conjuntos de datos a gran escala.

Validación con Casos Reales

Se analizará **una planificación diaria real** proporcionada por MIDES, correspondiente a un escenario de alta demanda operativa. Este caso de estudio representa una jornada particularmente compleja, que incluye no solo los turnos habituales matutino y vespertino, sino también un turno adicional para satisfacer un pico de solicitudes.

Se ha seleccionado este escenario de alta demanda por ser el más exigente y, por tanto, el más representativo para una validación rigurosa. Al validar el rendimiento del sistema bajo estas condiciones, se puede inferir su comportamiento en jornadas de demanda estándar, ya que un escenario de alta demanda engloba y supera la complejidad de uno de menor carga. Este enfoque permite una evaluación concisa y enfocada en el límite superior del rendimiento operativo requerido.

Esta planificación, debidamente anonimizada, servirá como línea base para evaluar las mejoras logradas por el sistema optimizado frente a la planificación

manual actual. Con el fin de proteger la privacidad de las personas involucradas y cumplir con los principios éticos de tratamiento de datos, se implementaron medidas específicas de anonimización que se detallan a continuación. Para garantizar la confidencialidad, todos los nombres reales fueron reemplazados por identificadores anónimos del tipo Usuario_01, Usuario_02, etc., y se ocultaron completamente los números telefónicos de los usuarios. Sin embargo, las direcciones se mantuvieron sin modificar, dado que constituyen un elemento esencial para la correcta visualización e interpretación de las rutas planificadas. La eliminación de esta información geográfica habría comprometido significativamente la capacidad de análisis del sistema y la validación de los resultados obtenidos. Estas medidas de anonimización selectiva permiten preservar tanto la privacidad de los usuarios como la integridad analítica del estudio.

Además del análisis del caso real simplificado, se realizará una segunda optimización sobre el mismo conjunto de datos, pero incorporando artificialmente requisitos de accesibilidad. Este experimento tiene como objetivo validar la capacidad del modelo para gestionar restricciones de capacidad dimensionales (espacio para sillas de ruedas, asientos para acompañantes) y de atributos de vehículos (disponibilidad de rampa eléctrica). De este modo, se evalúa el comportamiento del sistema en un escenario más complejo y representativo de la operativa completa.

Análisis de Escalabilidad

Se generará un **conjunto de datos sintético** que simule un escenario de crecimiento del servicio, escalando tanto el número de solicitudes como la flota disponible. Este análisis permitirá:

- Evaluar el comportamiento del algoritmo ante el crecimiento de la demanda.
- Identificar posibles cuellos de botella computacionales.
- Proyectar la capacidad del sistema para soportar la expansión futura del servicio.

6.1.3. Métricas de Evaluación

Para cada experimento se medirán las siguientes métricas clave:

Eficiencia Operativa:

- Distancia total recorrida por cada vehículo.
- **Usuarios no atendidos:** Número de personas cuyas solicitudes (al menos un viaje) no pudieron ser cubiertas.
- **Viajes no atendidos:** Número total de tramos individuales (idas o vueltas) que quedaron sin asignar a un vehículo.
- Tiempo de uso de vehículos.

Rendimiento Computacional:

- Tiempo de generación de la planificación.

Calidad del Servicio:

- Cumplimiento de ventanas de tiempo.
- Distribución de la carga (viajes asignados por vehículo).
- Tiempo promedio de espera entre que se abre la ventana para ser recogidos/llegar a un lugar

6.1.4. Estructura del Capítulo

Las secciones siguientes presentarán en detalle la configuración experimental 6.2, la selección y justificación de la estrategia de optimización 6.3, la validación de los casos base 6.4, análisis de casos reales 6.5, análisis de casos reales con requisitos de accesibilidad 6.6 y análisis de escalabilidad del sistema 6.7. Los resultados de este capítulo constituyen la base empírica que sustenta la contribución de este trabajo al problema de optimización del transporte accesible en contextos urbanos.

6.2. Configuración Experimental

Los experimentos descritos en este capítulo se llevaron a cabo en un entorno controlado, previo a la implementación del sistema en las operaciones diarias del cliente. El objetivo de esta fase fue validar el rendimiento del núcleo de optimización en un entorno de hardware estándar y accesible, demostrando así que la solución no requiere de infraestructura de computación de alto rendimiento (HPC) para ser efectiva.

Se utilizó un ordenador portátil de gama media para todas las pruebas, con el fin de simular las condiciones de un puesto de trabajo típico de un operador logístico. Las especificaciones técnicas del equipo empleado para la experimentación se detallan en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Especificaciones del hardware utilizado en la experimentación.

Componente	Especificación
Equipo	LAPTOP-96848U32
Procesador	Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU @ 2.50GHz (hasta 2.71 GHz)
Memoria RAM	8,00 GB (7,88 GB utilizables)
Almacenamiento	238 GB SSD (INTEL SSDPEKKW256G7)
Tarjeta Gráfica	Intel(R) HD Graphics 620 (integrada)
Sistema Operativo	64-bit, procesador basado en x64

El componente de enrutamiento, OSRM, fue configurado para generar las matrices de tiempo y distancia utilizando datos de OpenStreetMap. Específicamente, se utilizó el mapa de Uruguay (`'uruguay-latest.osm.pbf'`) obtenido del proveedor Geofabrik. Los datos fueron procesados con el perfil de conducción estándar para automóviles (`'car.lua'`) mediante los comandos `'osrm-extract'` y `'osrm-contract'` para crear la red de enrutamiento optimizada sobre la que el sistema realiza sus cálculos.

El entorno de software utilizado para la experimentación, que incluye el backend, el núcleo de optimización y las tecnologías subyacentes, ya fue descrito en detalle en la Sección ???. Por consiguiente, se remite al lector a dicho apartado para evitar la repetición de esta información y se procederá directamente con la presentación de los estudios propuestos.

6.2.1. Calibración del Perfil de Enrutamiento de OSRM

Una de las premisas fundamentales para la validez de un sistema de optimización de rutas es la precisión de su matriz de costos subyacente. Las estimaciones de tiempo de viaje deben reflejar de la manera más fiel posible las condiciones operativas reales. Las pruebas iniciales con el perfil de conducción por defecto de OSRM (`car.lua`) arrojaron tiempos de viaje sistemáticamente optimistas en comparación con herramientas de referencia como Google Maps y la experiencia de los operadores. Para corregir esta desviación y aumentar el realismo de las planificaciones generadas, se realizó una calibración manual del archivo `car.lua`. El objetivo fue introducir un mayor conservadurismo en las estimaciones, modelando implícitamente factores del mundo real como el tráfico, los semáforos y las demoras en maniobras. Los ajustes clave fueron los siguientes:

- **Reducción General de Velocidades:** Para obtener estimaciones más conservadoras, se redujeron las velocidades de circulación en toda la red. La velocidad por defecto en zonas no especificadas bajó de 10 a 8 km/h y el factor de reducción general pasó de 0.8 a 0.65. Se aplicaron reducciones específicas a los distintos tipos de vía, por ejemplo:
 - *Motorway* (Autopista): de 90 a 75 km/h.
 - *Trunk* (Vía principal): de 85 a 70 km/h.
 - *Primary* (Carretera primaria): de 65 a 50 km/h.
 - *Residential* (Zona residencial): de 25 a 20 km/h.
- **Penalización en Vías de Servicio:** Se disminuyó la velocidad en áreas de servicio, estacionamientos y caminos de acceso, reduciendo sus multiplicadores de velocidad para modelar una circulación más lenta y cautelosa en estas zonas.
- **Ajuste de Penalizaciones por Maniobra:** Se incrementaron las penalizaciones de tiempo para reflejar mejor las demoras operativas. La penalización por giros en U se aumentó de 20 a 35 segundos, y la de giros

estándar de 7.5 a 12 segundos, para contabilizar la espera en intersecciones.

Tras aplicar estos cambios, se reconstruyó la red de enrutamiento de OSRM para que todas las consultas de tiempo y distancia utilizaran este perfil calibrado. Esta modificación es fundamental, ya que asegura que las soluciones generadas por el optimizador se basen en estimaciones de tiempo más realistas y, por lo tanto, tengan una mayor probabilidad de ser factibles en la práctica.

6.3. Selección y Justificación de la Estrategia de Optimización

El rendimiento de un sistema de optimización complejo como el implementado no depende únicamente de la correcta formulación del modelo matemático, sino de manera crucial de la configuración algorítmica del solver. Google OR-Tools ofrece un amplio abanico de heurísticas para abordar el problema de enrutamiento de vehículos, las cuales se dividen en dos fases clave:

1. **Estrategia de Solución Inicial (First Solution Strategy):** Algoritmos constructivos que generan una primera solución factible. La calidad de este punto de partida puede influir drásticamente en el resultado final y en la velocidad de convergencia.
2. **Metaheurística de Búsqueda Local (Local Search Metaheuristic):** Algoritmos de mejora que exploran el vecindario de la solución actual para encontrar soluciones progresivamente mejores, intentando escapar de óptimos locales.

Una elección inadecuada de estas estrategias puede llevar a soluciones de baja calidad, tiempos de cómputo excesivos o, en el peor de los casos, la incapacidad de encontrar una solución factible para problemas complejos. Por lo tanto, antes de validar el sistema en diversos escenarios operativos, es imperativo realizar un análisis empírico para identificar la combinación de algoritmos más potente y robusta para las características específicas del problema del transporte accesible de MIDES.

6.3.1. Metodología del Análisis Comparativo

Para determinar la configuración óptima, se diseñó un experimento exhaustivo en dos fases, cruzando las principales estrategias disponibles en OR-Tools.

Fase 1: Filtrado de Estrategias. El primer objetivo fue identificar las combinaciones más prometedoras y descartar las no viables.

- **Conjunto de Datos de Prueba:** Se utilizó el escenario más exigente disponible: el caso de estudio real proporcionado por MIDES, modificado para incluir requisitos de accesibilidad (capacidades dimensionales y

de atributos de vehículo) y la restricción de descansos obligatorios para los choferes de 30 minutos. Este conjunto de datos consta de 50 viajes solicitados y una flota de 3 vehículos.

- **Combinaciones Probadas:** Se evaluaron 14 variantes de la `FirstSolutionStrategy` contra 6 `LocalSearchMetaheuristic`, generando un total de 84 ejecuciones.
- **Criterio de Parada:** Para asegurar una comparación justa y rápida, se estableció un límite de tiempo máximo de **30 segundos** para cada ejecución.

Fase 2: Análisis de Convergencia y Tiempo Límite. Con las 7 mejores estrategias de solución inicial identificadas en la primera fase, se realizó un segundo análisis más detallado para observar la evolución de la calidad de la solución en el tiempo y definir un límite de ejecución adecuado para el sistema final. En esta etapa, el tiempo de ejecución se amplió a **180 segundos** (3 minutos), permitiendo así evaluar con mayor profundidad el comportamiento de cada estrategia bajo un escenario de mayor complejidad.

El objetivo principal de este análisis dual es identificar la combinación que maximice el número de **viajes atendidos** (indicador clave de calidad de servicio) y, a partir de ello, entender la relación entre el tiempo de cómputo y la calidad de la solución para establecer un parámetro de ejecución óptimo.

6.3.2. Resultados y Análisis

Los resultados de las 84 ejecuciones iniciales revelaron una marcada diferencia en el rendimiento de las distintas estrategias, permitiendo una clara decantación hacia las configuraciones más efectivas.

Identificación de Estrategias No Viables. El primer hallazgo significativo fue que una gran proporción de las estrategias de solución inicial no fueron capaces de encontrar una sola solución factible para este problema complejo. Estrategias como `PATH_CHEAPEST_ARC`, `SWEEP`, `CHRISTOFIDES`, entre otras, fallaron sistemáticamente con todas las metaheurísticas, dejando los 50 viajes sin asignar. Este resultado subraya la importancia de este análisis previo, ya que una elección ingenua de la configuración podría haber resultado en un sistema completamente inoperante.

Comparación de Estrategias Exitosas. Las estrategias que sí lograron generar soluciones se compararon principalmente por su capacidad para atender la mayor cantidad de viajes. La Tabla 6.2 resume el mejor rendimiento obtenido en la Fase 1 por cada estrategia de solución inicial exitosa, independientemente de la metaheurística de búsqueda local utilizada.

Tabla 6.2: Resumen comparativo del mejor rendimiento por Estrategia de Solución Inicial.

Estrategia de Solución Inicial	Viajes Atendidos (Máx.)	Viajes Descartados (Mín.)
LOCAL_CHEAPEST_INSERTION	41	9
SAVINGS	40	10
AUTOMATIC	39	11
PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION	39	11
ALL_UNPERFORMED	39	11
GLOBAL_CHEAPEST_ARC	39	11
BEST_INSERTION	38	12

Para mas información de los resultados véase el Anexo A

Los resultados iniciales muestran que la estrategia LOCAL_CHEAPEST_INSERTION fue la que obtuvo el mejor rendimiento global, alcanzando la mayor cantidad de viajes atendidos (41) y el menor número de viajes descartados (11), especialmente cuando se combinó con la metaheurística TABU_SEARCH. Además, esta estrategia también mostró buenos desempeños cuando se utilizó junto a otras metaheurísticas, lo que evidencia una notable consistencia en su comportamiento.

Por otro lado, la estrategia SAVINGS logró un rendimiento competitivo al ser combinada también con TABU_SEARCH, aunque su desempeño fue algo menos consistente con el resto de las metaheurísticas, lo que podría indicar una mayor sensibilidad a la estrategia de mejora utilizada.

Finalmente, las estrategias PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION y AUTOMATIC mostraron exactamente el mismo rendimiento en esta comparación (39 viajes atendidos y 11 descartados), lo que sugiere fuertemente que la estrategia AUTOMATIC, en este contexto, seleccionó internamente PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION como su heurística base. Esta coincidencia refuerza la robustez y fiabilidad de PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION como una alternativa sólida incluso en configuraciones automáticas.

Para tomar una decisión final sobre el tiempo de ejecución, se procedió al análisis de convergencia.

Análisis de Convergencia y Definición del Tiempo Límite. El segundo experimento, con 180 segundos y la restricción de descansos, confirma los hallazgos iniciales y ofrece una visión más profunda. Las Figuras 6.1 y 6.2 comparan la evolución de la mejor metaheurística para cada una de las 7 mejores estrategias de solución inicial.

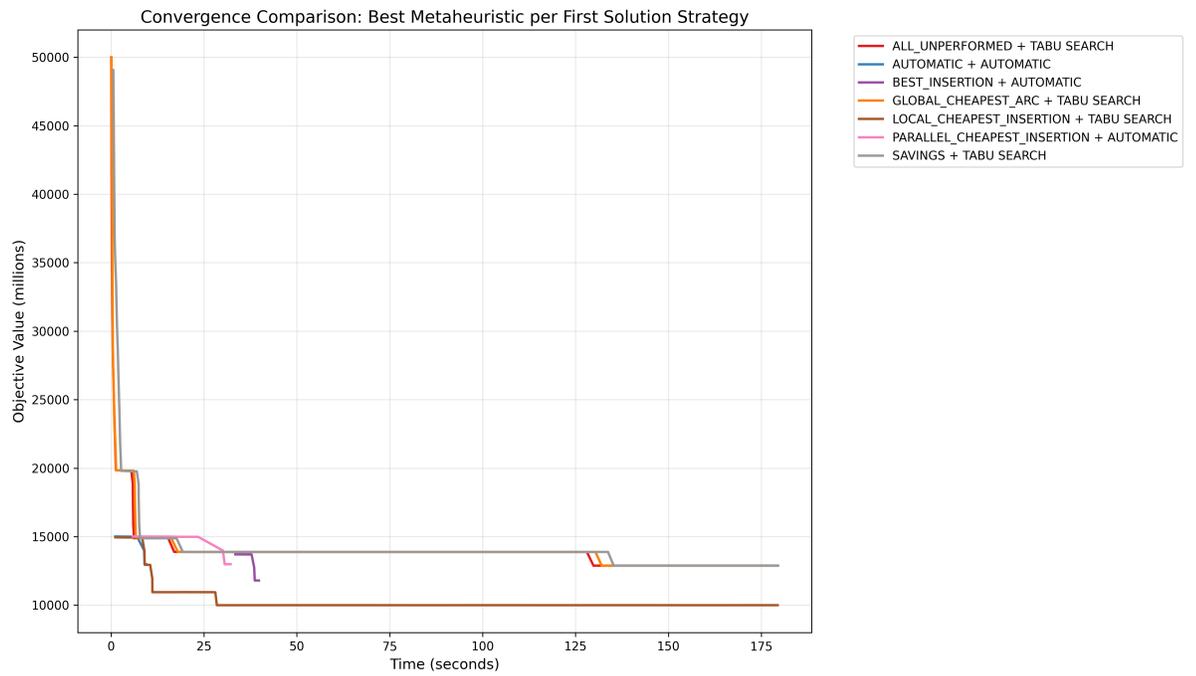


Figura 6.1: Evolución del costo de la solución. Comparativa de convergencia de las 7 mejores estrategias de solución inicial con un límite de 180s y restricción de descansos.

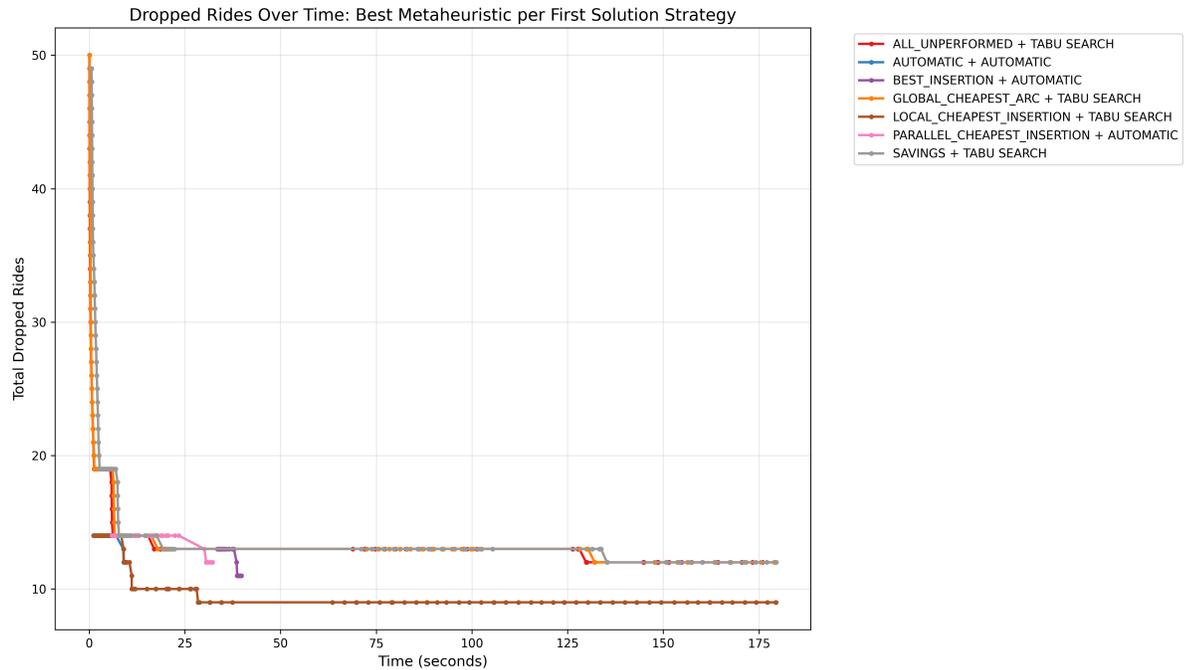


Figura 6.2: Evolución de viajes no atendidos. Comparativa de convergencia de las 7 mejores estrategias de solución inicial con un límite de 180s y restricción de descansos.

De estas gráficas se desprenden varias conclusiones clave:

- **Confirmación del Ganador:** La estrategia LOCAL_CHEAPEST_INSERTION (línea marron) se confirma como la más efectiva, alcanzando consistentemente el menor costo y el menor número de viajes descartados.
- **Evaluación de la Estrategia AUTOMATIC:** Un hallazgo importante es que la estrategia de primera solución AUTOMATIC, a pesar de lo que su nombre sugiere, no es necesariamente la mejor opción. Las gráficas muestran que su rendimiento es superado por varias otras estrategias. Uno podría suponer que OR-Tools seleccionaría internamente la mejor heurística, pero este análisis demuestra que no es el caso, lo que resalta la importancia de una configuración explícita y fundamentada.
- **Estancamiento de las Primeras Soluciones (Metaheurística AUTOMATIC):** Se observa un patrón claro en las estrategias BEST_INSERTION, AUTOMATIC y PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION. Aunque obtuvieron una solución inicial muy rápidamente (en los primeros segundos), su proceso de mejora se detuvo de forma prematura. Específicamente, la estrategia AUTOMATIC se estancó a partir de los 10 segundos, y las otras dos lo hicieron alrededor

de los 30 segundos. Pasado ese umbral, no lograron disminuir más la función de costo durante el tiempo restante. Este comportamiento coincide con que las tres utilizaron la metaheurística `AUTOMATIC` para la búsqueda local, la cual demostró ser incapaz de encontrar mejoras significativas más allá de ese punto de estancamiento.

- **Mejora Continua (Metaheurística `TABU_SEARCH`):** En contraste, las estrategias `SAVINGS`, `GLOBAL_CHEAPEST_ARC` y `ALL_UNPERFORMED` mostraron un comportamiento similar entre sí, mejorando sus soluciones de forma continua hasta el final del tiempo de ejecución. Notablemente, las tres encontraron una mejora simultánea (reduciendo los pedidos no atendidos) cerca del segundo 130. La estrategia ganadora, `LOCAL_CHEAPEST_INSERTION`, también exhibe esta capacidad de mejora constante. Este rendimiento superior se atribuye directamente al uso de la metaheurística `TABU_SEARCH`, diseñada para evitar óptimos locales y explorar el espacio de soluciones de manera más efectiva.
- **Definición del Tiempo Límite:** Es de particular interés observar en la Figura 6.2 que `LOCAL_CHEAPEST_INSERTION` alcanza su mínimo de 9 viajes descartados aproximadamente a los **26 segundos**. Esto demuestra que el límite inicial de 30 segundos, si bien es efectivo, puede resultar ajustado para garantizar soluciones de alta calidad. Sin embargo, para escenarios donde la velocidad es crítica, esta misma estrategia obtiene una excelente solución de 14 viajes descartados en menos de 1 segundo, lo que indica que un límite de 2-3 segundos sería viable si se prioriza la rapidez sobre la optimización exhaustiva.
- **Conclusión sobre Metaheurísticas:** De las seis metaheurísticas de búsqueda local disponibles en OR-Tools, solo dos fueron relevantes en esta comparativa: `AUTOMATIC` y `TABU_SEARCH`. Dado el rendimiento superior y consistente de las estrategias que emplearon `TABU_SEARCH`, se puede concluir que las otras cuatro metaheurísticas pueden ser descartadas para este tipo de problema, simplificando futuras optimizaciones.

Para un análisis visual detallado de la convergencia de cada una de estas 7 combinaciones de forma individual, se remite al lector al **Anexo A**.

6.3.3. Selección de la Estrategia Óptima

Basado en la evidencia empírica recolectada, donde se demuestra que la combinación de la estrategia de solución inicial y la metaheurística de búsqueda local tiene un impacto directo y significativo en la calidad de la solución final, se selecciona la siguiente configuración para el núcleo de optimización. Esta configuración, que demostró ser la más potente, será utilizada en todos los experimentos posteriores de este capítulo:

- **Estrategia de Solución Inicial:** `LOCAL_CHEAPEST_INSERTION`. Esta heurística constructiva demostró ser la más efectiva para construir una base sólida,

permitiendo alcanzar consistentemente soluciones con la mayor cantidad de servicios atendidos.

- **Metaheurística de Búsqueda Local: TABU_SEARCH.** A diferencia de análisis previos, en este escenario más complejo la elección de la metaheurística fue crucial. TABU_SEARCH fue el algoritmo de mejora que, en combinación con LOCAL_CHEAPEST_INSERTION, logró el mejor resultado absoluto, maximizando la eficiencia operativa al atender 40 de los 50 viajes solicitados.
- **Límite de Tiempo de Ejecución: 60 segundos.** El análisis de convergencia (Sección 6.3.2) mostró que la mejor solución se alcanzó en aproximadamente 26 segundos. Se establece un límite de 60 segundos (1 minuto) como un equilibrio pragmático: proporciona un margen de tiempo suficiente para que el solver explore exhaustivamente el espacio de soluciones en escenarios aún más complejos, asegurando resultados de alta calidad sin imponer tiempos de espera excesivos para un entorno operativo.

Esta combinación no solo produjo la solución con la mayor tasa de servicio, sino que lo hizo de manera robusta. Por lo tanto, se establece como la configuración por defecto para el sistema. La Tabla 6.3 detalla las métricas de la planificación generada con esta configuración óptima, la cual servirá como punto de referencia para las validaciones subsecuentes.

Tabla 6.3: Detalles de la solución con la estrategia óptima seleccionada (LOCAL_CHEAPEST_INSERTION + TABU_SEARCH).

Nº Ruta	Dist. (km)	Duración	Viajes
1	167.6	07:44:38	14
2	167.8	07:22:28	14
3	155.0	07:31:36	13

Habiendo justificado rigurosamente la configuración del motor de optimización, se procede con la validación del modelo en casos de uso fundamentales.

6.4. Validación de Casos Base

Como se introdujo en la metodología (Sección 6.1.2), el primer paso de la experimentación consistió en validar el comportamiento del núcleo de optimización con solicitudes individuales y controladas. Estos experimentos unitarios permitieron verificar la correcta aplicación de las restricciones fundamentales del DARP en un entorno simplificado. Para cada caso, se utilizó un único vehículo y una única solicitud, con el fin de aislar el comportamiento del solver.

6.4.1. Caso 1: Pedido de Solo Ida (Restricción en Destino)

Este escenario simula la necesidad de un usuario que debe llegar a un destino antes de una hora específica.

- **Configuración:** Un usuario solicita un viaje desde su domicilio (Punto A) a un centro médico (Punto B). Debe llegar al centro médico a las 9:00 a.m. como máximo.
- **Modelado en el sistema:** El operador ingresa la hora de llegada (9:00) en el destino. El sistema, con una tolerancia de 30 minutos, genera automáticamente una ventana de tiempo para la entrega en el Punto B de [8:30, 9:00]. La ventana de tiempo para la recogida en el Punto A queda abierta, permitiendo al optimizador calcular la hora de recogida óptima.
- **Resultado esperado y validación:** El solver debe generar una ruta que recoja al usuario y lo entregue en el Punto B dentro del intervalo [8:30, 9:00]. La prueba confirmó que el sistema respeta la hora máxima de llegada, planificando la recogida con la antelación justa para cumplir la restricción sin generar tiempos de espera innecesarios para el usuario.

6.4.2. Caso 2: Pedido de Solo Vuelta (Restricción en Origen)

Este caso representa a un usuario que termina una actividad y está disponible para ser recogido a partir de una hora determinada.

- **Configuración:** Un usuario solicita un viaje de vuelta desde un centro de rehabilitación (Punto C) a su domicilio (Punto D). El usuario está disponible para ser recogido a partir de las 14:00.
- **Modelado en el sistema:** El operador ingresa la hora de recogida (14:00) en el origen. El sistema, con la misma tolerancia, genera una ventana de tiempo para la recogida en el Punto C de [14:00, 14:30]. La ventana de tiempo para la entrega en el Punto D queda abierta.
- **Resultado esperado y validación:** La planificación debe programar la llegada del vehículo al Punto C nunca antes de las 14:00. El experimento validó que el optimizador respeta correctamente la cota inferior de la ventana de tiempo, evitando que el vehículo llegue prematuramente y obligue al conductor a esperar.

6.4.3. Caso 3: Pedido de Ida y Vuelta

Este es el caso más completo a nivel de una única solicitud, combinando las dos restricciones anteriores.

- **Configuración:** Un usuario necesita ir desde su casa (Punto A) a una cita (Punto B) a la que debe llegar antes de las 10:00, y ser recogido del mismo Punto B para volver a casa (Punto A) a partir de las 12:00.
- **Modelado en el sistema:** Se generan dos solicitudes conceptualmente separadas pero vinculadas al mismo usuario:

1. Un viaje de ida ($A \rightarrow B$) con ventana de tiempo en el destino B de [9:30, 10:00].
 2. Un viaje de vuelta ($B \rightarrow A$) con ventana de tiempo en el origen B de [12:00, 12:30].
- **Resultado esperado y validación:** El optimizador debe planificar ambas partes del viaje respetando sus respectivas ventanas de tiempo y la precedencia (el viaje de ida debe completarse antes de que comience el de vuelta). Las pruebas confirmaron que el sistema gestiona correctamente la interdependencia, pudiendo asignar el mismo vehículo (si la ruta es eficiente) o vehículos distintos para cada tramo, siempre cumpliendo las restricciones temporales.

6.4.4. Resolución de Ambigüedades en las Ventanas de Tiempo

Durante la validación de estos casos base, se detectó una problemática crítica que no era evidente en la planificación manual, pero que es fundamental para la automatización: la correcta interpretación de la hora proporcionada por el usuario. La planificación manual de MIDES (ver Sección 6.5.2) utilizaba una única columna **hmax** cuyo significado dependía del contexto, funcionando a veces como hora máxima de llegada y otras como hora mínima de recogida.

Inicialmente, el sistema no diferenciaba explícitamente entre estos dos tipos de restricciones al crear la ventana de tiempo. Un primer prototipo aplicaba la tolerancia siempre de la misma manera (ej. [hora - 30 min, hora]), lo que generaba un comportamiento incorrecto para los viajes de "solo vuelta". Por ejemplo, una recogida solicitada "a partir de las 14:00" se interpretaba erróneamente como una ventana de [13:30, 14:00], forzando al sistema a recoger al usuario antes de que estuviera disponible.

La ejecución de los casos base, en particular el "Pedido de Solo Vuelta", hizo que este error fuera inmediatamente visible. Gracias a este hallazgo temprano, se implementó la lógica actual: el sistema ahora solicita al operador que especifique si la hora ingresada corresponde a una **llegada** o a una **recogida**. En base a esta selección, construye la ventana de tiempo de manera correcta:

- **Si es llegada:** La ventana es [hora - tolerancia, hora].
- **Si es recogida:** La ventana es [hora, hora + tolerancia].

Esta validación incremental demostró ser indispensable para construir un modelo robusto y fiable, eliminando ambigüedades y asegurando que las soluciones optimizadas se alineen con las necesidades reales de los usuarios.

6.4.5. Optimización de Objetivos Múltiples: El Dilema entre Eficiencia y Calidad de Servicio

Una vez validado el correcto funcionamiento de las restricciones básicas, el siguiente desafío fue refinar el comportamiento del optimizador para que no

solo encontrara una ruta factible, sino una que fuera “óptima” desde múltiples perspectivas, a menudo en conflicto. El objetivo fundamental siempre es la minimización del coste operativo, representado principalmente por la distancia total recorrida. Sin embargo, surgen objetivos secundarios que son críticos para definir la calidad y eficiencia de la solución.

El principal dilema que se abordó en esta fase es la tensión entre dos de estos objetivos secundarios:

- **Eficiencia Operativa:** Minimizar el tiempo de actividad del vehículo (su “lapso global”) para reducir costes de combustible, mantenimiento y salario del conductor. Esto incentiva a iniciar las rutas lo más tarde posible y a compactarlas al máximo.
- **Calidad de Servicio:** Respetar las preferencias del cliente, lo que a menudo implica llegar al inicio de su ventana horaria, no al final, para que no llegue tarde a su destino (entrega) y/o reducir su tiempo de espera (recogida).

Para ilustrar y resolver este conflicto, se diseñó un caso de estudio específico, basado en el pedido de “Ida y Vuelta” previamente validado.

Caso de Estudio: La Tensión entre un Inicio de Ruta Compacto y una Entrega Temprana

El problema consiste en una ruta para un solo vehículo que debe atender las dos partes de un viaje de ida y vuelta.

Datos del Problema:

- **Vehículo:** Disponible en un turno de [06:00 a 14:00].
- **Viaje 1 (Ida):**
 - **Recogida (Pickup):** En “Bologna 2112”, sin ventana horaria específica.
 - **Entrega (Delivery):** En “Hospital de Clínicas”, con una ventana horaria estricta de [08:34 a 09:04].
- **Viaje 2 (Vuelta):**
 - **Recogida (Pickup):** En “Hospital de Clínicas”, con una ventana horaria de [11:04 a 11:34].
 - **Entrega (Delivery):** En “Bologna 2112”, sin ventana horaria específica.

La Búsqueda de la Solución Ideal: El objetivo es encontrar una ruta que satisfaga ambos criterios: eficiencia y calidad. Es decir, que el vehículo parta del depósito “justo a tiempo” para realizar la entrega a las **08:34**, la hora más temprana posible dentro de la ventana del pedido, sin generar tiempos muertos innecesarios al inicio del día. La solución deseada sería:

- **08:00** - Salida del Depósito
- 08:17 - Recogida en “Bologna 2112”
- **08:34** - Entrega en “Hospital de Clínicas”
- ...

Para lograrlo, se experimentó con diversas estrategias en OR-Tools, combinando el objetivo base de minimización de distancia con diferentes objetivos temporales, como se resume en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Comparativa de Estrategias de Optimización Temporal en OR-Tools

Estrategia	Funciones OR-Tools	Resultado
<i>Todas incluyen: <code>setArcCostEvaluatorOfAllVehicles(distancia)</code></i>		
1. Solo Distancia (sin objetivos temporales)	Ninguna adicional	Inicio a las 06:00, entrega a las 08:34. El vehículo parte muy temprano, generando tiempo muerto. Eficiencia: pésima, Calidad: buena.
2. Minimizar Lapso Global (eficiencia pura)	<code>timeDimension.setGlobalSpanCostCoefficient(0.5)</code>	Inicio a las 06:30, entrega a las 09:04. El inicio se retrasa al máximo posible, afectando la calidad. Eficiencia: excelente, Calidad: pésima.
3. Lapso Global + Finalizador (penalización por retraso)	<code>setGlobalSpanCostCoefficient(1)</code> <code>addVariableMinimizedByFinalizer(ora)</code>	Inicio a las 06:00, entrega a las 09:04. El solver (ora) la penalización en la fase de búsqueda principal, consiguiendo la peor solución. Eficiencia: pésima, Calidad: pésima.
4. Solución Final: Coste Equilibrado	<code>setGlobalSpanCostCoefficient(1)</code> <code>setCumulVarSoftUpperBound(...)</code>	Inicio a las 08:00, entrega a las 08:34. Equilibrio óptimo entre eficiencia y calidad. Eficiencia: excelente, Calidad: excelente.

Análisis de la Solución Exitosa y Lecciones Aprendidas

La experimentación reveló una lección fundamental sobre el funcionamiento interno de OR-Tools: la diferencia crítica entre cómo el solver trata los costes durante su búsqueda y cómo los evalúa al final.

El Problema de los “Finalizadores”. Las estrategias iniciales que usaban `addVariableMinimizedByFinalizer` (Estrategia 3) fracasaron porque estos costes no forman parte de la función objetivo principal que guía la búsqueda local del solver. Los finalizadores se aplican *después* de que la búsqueda ha terminado, actuando más como un criterio de selección entre soluciones ya encontradas que como una guía para encontrarlas. En nuestro caso, como la búsqueda principal solo estaba guiada por el `GlobalSpanCost`, nunca generó una solución con entrega temprana para que el finalizador pudiera elegirla.

La Solución: Integrar Costes en la Búsqueda Principal. La estrategia exitosa (Estrategia 4) funcionó porque utilizó dos funciones que sí se integran en la función de coste principal del solver:

1. `timeDimension.setGlobalSpanCostCoefficient(1)`: Esta función crea una fuerza constante que incentiva al solver a compactar la ruta (eficiencia).
2. `timeDimension.setCumulVarSoftUpperBound(..., 1000)`: Esta función crea una “barrera de coste” que penaliza fuertemente al solver si la hora de llegada a un punto supera un umbral deseado (calidad de servicio).

Al estar ambas fuerzas presentes durante el proceso de toma de decisiones del solver, este pudo encontrar el equilibrio perfecto. La búsqueda se comportó de la siguiente manera:

1. El `GlobalSpanCost` empuja el inicio de la ruta desde las 06:00 hacia adelante, buscando eficiencia.
2. La ruta se sigue compactando hasta que el inicio llega a las **08:00**. En este punto, la entrega en el hospital se alinea exactamente con las **08:34**.
3. El solver evalúa retrasar el inicio un segundo más, a las 08:00:01. Este movimiento le daría una pequeña recompensa por el `GlobalSpanCost` (coste de 1), pero incurriría en una enorme penalización por el `SoftUpperBound` (coste de 1000), ya que la entrega ocurriría un segundo después del umbral.
4. Al ser la penalización mucho mayor que la recompensa, el solver concluye que **08:00 es el punto de inicio óptimo** y detiene la compactación.

Conclusión Final. La lección clave extraída de esta validación es que para modelar objetivos en conflicto de manera efectiva en OR-Tools, no basta con asignar costes; es crucial entender *nde* y cuándo se aplican esos costes en el proceso de solución. Para guiar activamente la búsqueda del solver hacia soluciones complejas y equilibradas, los objetivos de coste deben integrarse en la evaluación principal de la ruta, utilizando herramientas como los costes de arco, los costes de lapso global y los límites suaves de las dimensiones, en lugar de depender únicamente de los finalizadores. Este conocimiento fue directamente incorporado en el modelo final utilizado para los análisis a gran escala.

6.5. Análisis de Casos Reales: Planificaciones de MIDES

En esta sección se presenta la validación del sistema utilizando datos operativos reales proporcionados por MIDES. El análisis se centra en comparar las planificaciones generadas manualmente por los operadores de MIDES con las soluciones optimizadas producidas por el sistema propuesto. Como se mencionó

anteriormente, todos los datos personales han sido anonimizados para proteger la privacidad de los usuarios, reemplazando nombres por identificadores genéricos.

6.5.1. Simplificaciones del Modelo para la Validación Inicial

Para establecer una línea base clara y evaluar el rendimiento del algoritmo central de DARP, esta primera fase de experimentación se centró en un conjunto de datos de prueba que no incluía solicitudes con requisitos específicos de accesibilidad. Es decir, el sistema se evaluó sin procesar viajes que tuvieran las siguientes características:

- **Necesidad de espacio para silla de ruedas:** No se incluyeron solicitudes que demandaran un espacio específico para silla de ruedas.
- **Requerimiento de rampa eléctrica:** Ningún viaje de prueba especificó la necesidad de un vehículo equipado con rampa eléctrica.
- **Presencia de acompañantes:** No se consideraron viajes con acompañantes que ocuparan un asiento adicional.

Esta decisión metodológica no implicó una modificación o simplificación del código del optimizador, sino una selección deliberada de los datos de entrada. Esta elección se fundamenta en dos motivos clave. Primero, permite aislar y cuantificar las mejoras fundamentales en distancia y tiempo que ofrece la optimización algorítmica pura. En segundo lugar, esta decisión respondió a una limitación práctica: los registros históricos proporcionados por MIDES no contenían esta información. Sencillamente, los datos sobre si un viaje requería silla de ruedas, rampa o incluía un acompañante no se guardaban, por lo que fue imposible incluirlos en esta validación retrospectiva.

Es importante reconocer que, si bien esta omisión permite una comparación directa del enrutamiento, también representa una limitación en la evaluación. Aunque el sistema está diseñado para gestionar estas complejidades, en este escenario de prueba no se activaron dichas restricciones. Como resultado, el optimizador operó considerando únicamente la capacidad total de pasajeros de cada vehículo. Un análisis posterior abordará la incorporación de estas variables para validar el modelo completo y su capacidad para gestionar la heterogeneidad de la flota y las necesidades de los usuarios.

6.5.2. Análisis del Caso Real: Jornada de Alta Demanda

El escenario seleccionado, denominado en adelante **Caso de Estudio Real**, corresponde a una jornada operativa de alta demanda en MIDES, caracterizada por la inclusión de un tercer turno operativo para gestionar un volumen de viajes superior al habitual. Se procesó el conjunto de viajes de este día, que originalmente fue planificado de forma manual por el personal de la institución.

A continuación, se compara la planificación manual original con la solución generada por el sistema de optimización.

Parámetros de Optimización para el Caso de Estudio Real

Para generar la planificación optimizada que se presenta a continuación, se configuró el núcleo de optimización con un conjunto de parámetros iniciales. Estos valores fueron seleccionados como un punto de partida razonable y se espera que sean ajustados en el futuro con base en la retroalimentación de los operadores durante el uso diario del sistema. Los parámetros clave utilizados se describen a continuación y en la Tabla 6.14.

- **Descansos de los conductores:** Se configuró una pausa obligatoria de 30 minutos. Esta pausa puede ser tomada en cualquier momento dentro de una ventana que comienza 1 hora después del inicio del turno y finaliza 1 hora antes de su conclusión.
- **Tiempos de servicio (recogida/entrega):** Se asignó un tiempo de 2 minutos para el ascenso o descenso de pasajeros que no requieren el uso de la rampa y/o viajan en silla de ruedas, y un tiempo de 5 minutos para los que si.
- **Penalización por no atender una solicitud (Drop Penalty):** Se estableció un valor de penalización de 1×10^9 . Este valor extremadamente alto instruye al algoritmo para que evite a toda costa dejar solicitudes sin asignar, a menos que sea matemáticamente imposible cumplirlas dentro de las demás restricciones.
- **Tiempo máximo de viaje por usuario:** Se limitó el tiempo máximo que una persona puede permanecer a bordo del vehículo a 5000 segundos (aproximadamente 1 hora y 23 minutos) desde su recogida hasta su entrega.
- **Tolerancia de ventana de tiempo:** Se configuró una tolerancia de 30 minutos para la creación automática de ventanas de tiempo. Cuando se ingresa una solicitud con una hora objetivo, el sistema utiliza esta tolerancia para crear un intervalo flexible. Por ejemplo, una llegada requerida a las 9:00 se convierte en una ventana de [8:30, 9:00], mientras que una recogida disponible a partir de las 10:00 se transforma en una ventana de [10:00, 10:30]. Esto otorga al optimizador la flexibilidad necesaria para encontrar soluciones eficientes.
- **Parámetros del Algoritmo de Optimización:**
 - **Estrategia de búsqueda:** Se utilizó la configuración estándar recomendada por Google OR-Tools para este tipo de problemas:
 - *Solución inicial: FirstSolutionStrategy::Value::AUTOMATIC.* El solver elige heurísticamente el método más adecuado para generar la primera solución viable.

- *Metaheurística de búsqueda local*: `LocalSearchMetaheuristic::Value::GUIDED_LOCAL_SEARCH`. Se emplea para refinar iterativamente la solución inicial.
- **Límite de tiempo de cómputo**: Se estableció un máximo de 10s para la ejecución del solver. Aunque este valor puede parecer bajo, en las pruebas realizadas incluso con un límite de 1s se obtuvieron soluciones satisfactorias. Por lo tanto, el límite se extendió a 10s como margen adicional, manteniéndose igualmente en un rango muy reducido para un entorno operativo.

Tabla 6.5: Flota de vehículos y configuración utilizada en el experimento.

Identificador	Cap. Sillas Ruedas	Cap. Asientos	Turno ¹	Rampa ²
SBH 9074	4	5	Mañana	Manual
SBH 2740	4	5	Mañana	Eléctrica
SCQ 4726	5	5	Tarde	Manual

¹ Los turnos asignados (Mañana/Tarde) corresponden a la configuración del experimento. No se dispone de información sobre cómo MIDES distribuyó los vehículos en la planificación manual original.

² El tipo de rampa es una restricción crítica. Las solicitudes que requieren rampa eléctrica solo pueden ser asignadas a vehículos con dicha característica.

A continuación, se presenta un análisis comparativo entre la planificación manual original y la solución generada por el sistema. Los informes de ruta completos, que incluyen las hojas de ruta detalladas para cada vehículo y la lista de solicitudes no atendidas, se pueden consultar en el **Anexo B.1**.

Interpretación de las Planificaciones: Manual vs. Optimizada

Para comprender la magnitud de las mejoras, es fundamental entender cómo se representa la información en cada uno de los informes presentados. Ambos informes, el manual y el optimizado, se componen de dos partes principales: la hoja de ruta de los vehículos con los viajes asignados y una sección separada para las solicitudes no atendidas. A continuación, se detalla la estructura y el significado de los datos en cada planificación.

Planificación Manual de MIDES El primer PDF corresponde a la planificación original, elaborada manualmente por el personal de MIDES. Su formato es el resultado de la práctica operativa diaria y contiene las siguientes columnas: Hora, nombre, apellido, direccion, destino, telefono y hmax.

- La columna Hora indica la hora programada en la que el vehículo debe pasar por la direccion para realizar una acción (recogida o entrega).
- La columna hmax es particularmente compleja, ya que su interpretación depende del tipo de viaje. Para ilustrarlo, tomemos el caso de Usuario_03:

1. **Viaje con restricción de llegada:** Si el usuario debe estar en su destino (ej. Hospital de Clínicas) a las 9:00 a.m. como máximo, el valor en **Hmax** representa esa hora límite de llegada.
2. **Viaje con restricción de salida:** Si el usuario termina una actividad (ej. sale del Hospital de Clínicas) a las 10:00 a.m. y a partir de ese momento está disponible para ser recogido, ese horario también se anota en la columna **Hmax**. En este segundo caso, el valor funciona en la práctica como una hora de recogida mínima (**Hmin**), no máxima.

Esta ambigüedad funcional fue una de las principales motivaciones para rediseñar la estructura del informe en la solución optimizada.

- Finalmente, el tipo de operación se infiere por la estructura de la fila. Aquellas que respetan el formato de columnas representan una recogida (*pickup*). En cambio, las filas que no siguen este patrón, como por ejemplo “Dejas a usuario_05, usuario_06, Usuario_07”, indican una entrega (*delivery*), permitiendo agrupar múltiples descensos en una única línea.

Planificación Generada por el Sistema Optimizador El segundo PDF muestra la hoja de ruta generada por el sistema, diseñada para ser inequívoca y fácil de interpretar. Las columnas son: **Hmin**, **Hora**, **Hmax**, **Accion**, **Direccion**, **Lugar** y **Contacto Usuario**.

- La mejora más notable es la separación de las restricciones temporales en **Hmin** (hora mínima) y **Hmax** (hora máxima), creando una ventana de tiempo explícita para cada parada.
- Es importante destacar que, al crear una solicitud en el sistema, el operador solo ingresa una hora de referencia. El software determina inteligentemente si se trata de un límite de llegada o un inicio de disponibilidad para la recogida y, utilizando un parámetro de tolerancia, construye la ventana horaria automáticamente. La columna **Hora** representa la hora exacta, calculada por el optimizador, en la que el vehículo debe llegar a la parada, siempre dentro del intervalo [**Hmin**, **Hmax**].
- La columna **Accion** estandariza la descripción de cada evento. Los valores posibles son **Comienzo** o **Fin** para marcar el inicio y la finalización de la ruta de un vehículo (generalmente en el depósito), y **Recoger a {usuario_x}** o **Dejar a {usuario_x}** para las paradas de los pasajeros.

Una mejora adicional en la claridad es la inclusión explícita de la parada de **Descanso del Conductor** en la hoja de ruta, con su propia ventana de tiempo, garantizando que se respete el descanso del chofer y se planifique de manera óptima dentro de la jornada.

En cuanto a las solicitudes no atendidas, el sistema proporciona una visión más detallada y transparente al dividir las en dos categorías distintas, presentadas en tablas separadas:

- **Solicitudes no atendidas por el optimizador:** Corresponde a los viajes, agrupados por el usuario que los pidió, que, a pesar de haber sido enviados al núcleo de optimización, no pudieron ser asignados a ninguna ruta sin violar alguna de las restricciones del problema (capacidad, ventanas de tiempo, tiempo máximo de viaje, etc.).
- **Solicitudes no seleccionadas para optimizar:** Esta tabla aporta una nueva capa de transparencia sobre el proceso de planificación. Muestra los viajes que, si bien estaban registrados en el sistema para esa fecha, no fueron seleccionados por el operador para ser incluidos en la planificación del día. Esta exclusión es una decisión consciente del planificador, cuyos motivos no quedan registrados en el sistema. Esta distinción es crucial, ya que permite auditar el proceso operativo completo, diferenciando entre las solicitudes que el optimizador no pudo asignar y aquellas que, por una decisión previa, ni siquiera fueron consideradas para la planificación de esa jornada.

Análisis Comparativo de Resultados

El análisis de ambas planificaciones revela diferencias significativas tanto a nivel cuantitativo como cualitativo. A continuación, se discuten los hallazgos más relevantes, que servirán como base para la evaluación general del sistema.

Reducción de Solicitudes No Atendidas y el Impacto del Realismo A primera vista, el sistema optimizador demuestra una clara mejora en la capacidad de servicio. Mientras que la planificación manual dejó a **11 usuarios** sin atender (lo que corresponde a un total de 18 viajes individuales), la solución optimizada final solo dejó a **7 usuarios** sin servicio (correspondientes a 13 viajes individuales). Esta reducción, tanto en el número de personas afectadas como en el total de servicios no prestados, representa un aumento significativo en la eficiencia del servicio.

Sin embargo, es crucial analizar este resultado en el contexto de la calibración del modelo de tiempos de viaje descrita en la Sección 6.2.1. En una fase experimental previa, utilizando el perfil de OSRM por defecto (con tiempos de viaje demasiado optimistas), el sistema lograba atender aún más solicitudes, dejando únicamente 4 usuarios sin asignar.

El paso de 4 a 7 usuarios sin atender tras la calibración no debe interpretarse como un empeoramiento del algoritmo, sino todo lo contrario: es una evidencia de la robustez del modelo. Al trabajar con tiempos de viaje más realistas y conservadores, el sistema descarta soluciones que solo eran factibles en condiciones idealizadas y que probablemente habrían fallado en la operación real por márgenes de tiempo insuficientes.

Este hallazgo subraya una lección fundamental: la calidad de una planificación optimizada depende directamente de la fidelidad de sus datos de entrada. Un resultado numéricamente superior basado en datos irreales es, en la práctica, inferior a un resultado ligeramente más modesto pero fundamentado en una

representación más precisa de la realidad.

La verdadera viabilidad de las rutas generadas deberá ser validada en la práctica, pero el modelo calibrado ofrece un punto de partida mucho más fiable y honesto.

Agrupación Lógica y Complejidad de las Rutas Una de las ventajas más notables del sistema optimizador es su capacidad para identificar sistemáticamente oportunidades de agrupación de viajes y construir secuencias complejas que maximizan la eficiencia, una tarea que, si bien es posible manualmente, se vuelve exponencialmente más difícil a medida que aumenta el número de solicitudes. El algoritmo no solo agrupa viajes por proximidad, sino que también entrelaza recogidas y entregas de manera óptima.

Un ejemplo ilustrativo es el caso de Usuario_15 y Usuario_16. Ambos usuarios se dirigen al mismo destino (MAR DEL PLATA) y sus puntos de recogida son geográficamente cercanos. El sistema genera una ruta eficiente donde un vehículo los recoge de manera consecutiva antes de emprender el viaje hacia el destino común, minimizando desvíos innecesarios. Este es solo uno de varios casos similares que se pueden observar en la planificación, donde la consolidación de viajes reduce la distancia total y mejora la utilización de los vehículos.

Más allá de la agrupación por proximidad, el sistema demuestra su capacidad para construir secuencias de viaje complejas respetando todas las restricciones impuestas. El caso del Usuario_22 es particularmente revelador. Este usuario es recogido a las 7:06 y dejado en su destino a las 8:30. Durante el trayecto intermedio, que dura casi una hora y media, el vehículo no solo realiza las entregas de otros dos pasajeros que ya estaban a bordo, sino que también recoge a otros dos usuarios nuevos.

Esta secuencia entrelazada es de gran interés porque pone a prueba una de las restricciones clave del modelo: el tiempo máximo que un pasajero puede permanecer a bordo. El tiempo total de viaje para Usuario_22 es de 1 hora y 24 minutos, un valor que se ajusta de manera precisa al límite máximo configurado de 5000 segundos (aproximadamente 1 hora y 23 minutos). Este ejemplo demuestra que el optimizador no solo encuentra rutas factibles, sino que es capaz de utilizar todo el "presupuesto" de tiempo disponible para maximizar el número de servicios atendidos, generando soluciones de alta densidad que serían extremadamente difíciles de calcular y validar manualmente.

Evaluación Cuantitativa de Métricas Clave Para complementar el análisis cualitativo, se realizó una comparación cuantitativa de ambas planificaciones según las métricas definidas en la metodología.

Eficiencia Operativa Las métricas de distancia y tiempo de uso de los vehículos son fundamentales para medir el ahorro de recursos. En la Tabla 6.6 y la Tabla 6.7 se resumen estos valores.

Es importante notar que, dado que la planificación manual no especifica qué vehículo realizó cada ruta, se han agrupado en tres entidades genéricas para la

Tabla 6.6: Métricas de Eficiencia - Planificación Manual.

Vehículo	Tiempo de Uso (hh:mm)
Vehículo 1	~ 8 horas
Vehículo 2	~ 8 horas
Vehículo 3	~ 8 horas
Total	24 horas

* No se dispone de la hora exacta de salida y llegada al depósito, pero se considera un turno estimado de trabajo de 6:00 a 14:00 o de 13:00 a 21:00, según corresponda.

comparación. Asimismo, no se reporta la distancia total recorrida, ya que no se dispone de datos confiables sobre los trayectos seguidos por los conductores.

Tabla 6.7: Métricas de Eficiencia - Planificación Optimizada.

Vehículo	Distancia Total Recorrida (km)	Tiempo de Uso (hh:mm)
SBH 2740	~ 143km	~ 7 horas 25 minutos
SBH 9074	~ 155km	~ 7 horas 33 minutos
SCQ 4726	~ 161km	~ 7 horas 39 minutos
Total	459	22:37

En cuanto a las solicitudes no atendidas, la planificación manual registró un total de **10**, mientras que la planificación optimizada redujo este número a **7**.

Rendimiento Computacional El tiempo requerido para generar cada planificación es una métrica fundamental para evaluar la viabilidad práctica de la herramienta en un entorno operativo. La diferencia entre el proceso manual y el automatizado es drástica, como se muestra en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8: Comparativa de Tiempo de Generación de la Planificación.

Tipo de Planificación	Tiempo de Generación
Manual (estimado)	~ 2 horas
Optimizada por el Sistema	menos de 1 minuto

La reducción del tiempo de planificación de horas a segundos no solo supone un ahorro de tiempo para el personal, sino que también permite la posibilidad de recalcular rápidamente las rutas ante imprevistos, como la cancelación de un viaje o la incorporación de una solicitud de última hora.

Calidad del Servicio Más allá de la eficiencia, se evaluó la calidad del servicio ofrecido al usuario final, midiendo la distribución de la carga de trabajo y el cumplimiento de las expectativas temporales (Tablas 6.9 y 6.10).

Tabla 6.9: Métricas de Calidad de Servicio - Planificación Manual.

Vehículo	Viajes Asignados*	Cumplimiento Ventanas**
Vehículo 1	11	05,08,09,10
Vehículo 2	11	14,15,16
Vehículo 3	10	18,19

* Cada tramo individual (ej. una ida o una vuelta) se contabiliza como un viaje asignado.

** Los usuarios que según lo planificado no llegaron a su destino antes de H_{\max} , solo se agregan los viajes de ida, que son los que mas importa cumplir el H_{\max} .

Nota sobre el cumplimiento de ventanas: A modo ilustrativo, se detalla el análisis para el Vehículo 1. El usuario 05 no cumple con su ventana temporal porque su H_{\max} es a las 08:00 en MEC. Aunque no se especifica la hora exacta de llegada, se observa que el vehículo recoge al usuario 07 a las 08:05, y luego se dirige a dejar al usuario 05, por lo que claramente no llega a destino antes de las 08:00. Para los usuarios 08, 09 y 10 ocurre algo similar: todos tenían como destino Castro y Pena, con H_{\max} a las 09:00. Sin embargo, el usuario 10 recién es recogido a las 09:10, y luego se realiza el trayecto hacia el destino, excediendo el límite permitido. El análisis para los demás vehículos sigue la misma lógica.

Tabla 6.10: Métricas de Calidad de Servicio - Planificación Optimizada.

Vehículo	Viajes Asignados*	Cumplimiento Ventanas	Tiempo Espera Prom. (min)**
SBH 9074	10	100 % (por diseño)	5.5
SBH 2740	13	100 % (por diseño)	8.46
SCQ 4726	14	100 % (por diseño)	11.5

* Cada tramo individual (ej. una ida o una vuelta) se contabiliza como un viaje asignado.

** Tiempo de espera desde el inicio de la ventana de disponibilidad hasta la recogida/llegada efectiva, promediado entre todas las ventanas. Ejemplo: si una ruta tiene 10 acciones con restricciones de tiempo y el total de minutos de espera es 55, entonces $55/10 = 5.5$.

El sistema optimizado garantiza por diseño el cumplimiento de todas las ventanas de tiempo, una restricción dura del modelo. Al analizar la tabla de resultados optimizados, se observa que la distribución de Viajes Asignados (10, 13 y 14) es menos homogénea en comparación con la planificación manual (11, 11 y 10). Esta diferencia es una consecuencia directa de los objetivos del modelo: no se buscó activamente balancear la carga de trabajo, ya que se priorizó maximizar el número total de solicitudes atendidas. Resulta más beneficioso para el sistema global atender más viajes, aunque un vehículo/chofer trabaje más que otro.

Por el contrario, el Tiempo Espera Promedio sí fue un factor clave que el

optimizador buscó minimizar activamente para mejorar la calidad del servicio al usuario. A diferencia de la distribución de viajes, que no era una meta a equilibrar, reducir este tiempo de espera fue un objetivo secundario de optimización. Esto demuestra que el modelo no solo cumple con las restricciones duras (llegar a destino a tiempo), sino que también busca mejorar la experiencia del pasajero, reduciendo la espera innecesaria desde el inicio de su ventana de disponibilidad. En la planificación manual, el cumplimiento de ventanas no es medible, ya que opera con una única hora de referencia (**hmax**) en lugar de ventanas explícitas [**Hmin**, **Hmax**].

6.6. Validación del Modelo con Requisitos de Accesibilidad

Para este segundo análisis, se modificó el conjunto de datos del **Caso de Estudio Real** para simular una distribución heterogénea de necesidades entre los usuarios. Los requisitos se asignaron de forma aleatoria siguiendo la siguiente distribución: un 50 % de los pedidos se mantuvieron como estándar (sin requisitos especiales), un 30 % requirieron espacio para silla de ruedas, y un 20 % especificaron la necesidad de una rampa eléctrica. Un mismo usuario podía requerir tanto silla de ruedas como rampa. Adicionalmente, para cualquier viaje con un requisito especial, se asignó una probabilidad del 50 % de incluir un acompañante, ocupando un asiento adicional.

El resultado de esta optimización, que se presenta a continuación, revela el impacto significativo que estas restricciones adicionales tienen sobre la capacidad del servicio. El informe detallado de la planificación generada para este escenario se encuentra disponible en el **Anexo B.2**.

La introducción de estas nuevas restricciones resulta en un aumento drástico de las usuarios no atendidas, que ascienden a **12**, (que representan un total de 23 viajes individuales), en contraste con las 7 del escenario sin requisitos específicos. Un análisis detallado revela dos cuellos de botella principales que explican esta diferencia. El factor más determinante es la disponibilidad de la rampa eléctrica. En la flota de MIDES, solo un vehículo, la **MERCEDES BENZ Sprinter “Microbus” (año 2009) – Matricula SBH 9074**, está equipado con esta facilidad. Dado que este vehículo fue asignado al turno de la mañana, todas las solicitudes de la tarde que requerían una rampa eléctrica se volvieron imposibles de atender, siendo automáticamente descartadas por el optimizador.

En segundo lugar, la inclusión de acompañantes reduce la capacidad efectiva de pasajeros de los vehículos, limitando la habilidad del algoritmo para consolidar múltiples viajes en una misma ruta y, por ende, disminuyendo la eficiencia global de la flota. Este experimento demuestra la correcta implementación de las restricciones de atributos y capacidad en el modelo, y subraya cómo las

limitaciones de la flota son un factor crítico en la capacidad real del servicio.

Evaluación Cuantitativa de Métricas Clave

A continuación, se presenta un análisis cuantitativo de la planificación generada para el escenario con requisitos de accesibilidad. Es fundamental destacar que, al tratarse de un caso de estudio creado artificialmente para probar los límites del sistema, no existe una planificación manual de referencia con la cual realizar una comparación directa. El objetivo de esta evaluación no es medir la mejora relativa, sino validar el comportamiento del sistema bajo un conjunto de restricciones más complejo y realista, cuantificando su rendimiento en términos absolutos.

Eficiencia Operativa Las métricas de distancia y tiempo de uso de los vehículos se resumen en la Tabla 6.11. Estos valores reflejan la operativa de la flota bajo las severas restricciones impuestas por los requisitos de los usuarios y la disponibilidad de vehículos adecuados.

Tabla 6.11: Métricas de Eficiencia - Accesibilidad

Vehículo	Distancia Total Recorrida (km)	Tiempo de Uso (hh:mm)
SBH 2740	164.9 km	7:24
SBH 9074	116.6 km	7:08
SCQ 4726	131 km	6:42
Total	412.5 km	21:24 hs:min

Como se mencionó en el análisis cualitativo, el número de solicitudes no atendidas en este escenario fue de **15**, un incremento notable respecto al caso base, lo que evidencia el impacto directo de las restricciones de accesibilidad en la capacidad del servicio.

Rendimiento Computacional A pesar de la mayor complejidad introducida por las restricciones dimensionales (sillas de ruedas, acompañantes) y de atributos (rampa eléctrica), el tiempo de cómputo se mantuvo dentro de los límites operativos definidos, demostrando la escalabilidad del solver.

Tabla 6.12: Tiempo de Generación - Planificación con Requisitos de Accesibilidad.

Tipo de Planificación	Tiempo de Generación
Optimizada (con accesibilidad)	menos de 1 minuto

Calidad del Servicio La Tabla 6.13 detalla las métricas de calidad para los viajes que el sistema sí pudo asignar. Aunque un número significativo de

solicitudes no fue atendido, aquellas que sí lo fueron cumplieron con todas las restricciones temporales y de servicio.

Tabla 6.13: Métricas de Calidad de Servicio - Planificación Optimizada con Requisitos de Accesibilidad.

Vehículo	Viajes Asignados*	Cumplimiento Ventanas	Tiempo Espera Prom. (min)**
SBH 9074	11	100 % (por diseño)	8.81
SBH 2740	7	100 % (por diseño)	0.7
SCQ 4726	9	100 % (por diseño)	6.8

* Cada tramo individual (ej. una ida o una vuelta) se contabiliza como un viaje asignado.

** Tiempo de espera desde el inicio de la ventana de disponibilidad hasta la recogida/llegada efectiva, promediado entre todas las ventanas.

La tabla muestra la distribución de la carga y la calidad del servicio para los viajes que sí pudieron ser atendidos. Este resultado valida que el sistema no solo resuelve el problema, sino que su solución refleja fielmente las limitaciones operativas, proporcionando un diagnóstico claro de los cuellos de botella de la flota.

Adicionalmente, este escenario de alta restricción hace aún más evidente la distribución desigual de la carga de trabajo entre los conductores. Como se puede observar en las tablas, existen diferencias notables en la cantidad de viajes asignados, los kilómetros recorridos y las horas de uso de cada vehículo. Tal como se explicó previamente, el modelo actual no incluye el balanceo de carga como un objetivo de optimización, ya que su prioridad es maximizar el número total de solicitudes atendidas. Si bien esta es una decisión estratégica para mejorar la eficiencia global del servicio, se reconoce que una carga de trabajo desequilibrada puede ser una desventaja desde una perspectiva de gestión de personal. Por este motivo, la introducción de mecanismos para balancear la carga entre los vehículos se ha identificado como una mejora prioritaria, y se discute como una línea de trabajo futuro en el Capítulo 7.

6.7. Análisis de Escalabilidad y Rendimiento

Uno de los objetivos fundamentales de la validación experimental es analizar la capacidad del sistema para escalar y mantener su rendimiento ante un aumento significativo de la demanda. Para evaluar este aspecto, se diseñó un **Caso de Estudio de Escalabilidad**, en el cual se generó un conjunto de datos sintético basado en el escenario real, pero con un volumen considerablemente mayor.

El conjunto de datos original, compuesto por 29 solicitudes de usuarios, fue ampliado artificialmente hasta alcanzar un total de **100 solicitudes** para una única jornada operativa. Para poder gestionar este incremento en la demanda, la

flota también fue ajustada, incorporando un total de **8 vehículos** distribuidos en dos turnos: cuatro asignados al turno de la mañana y cuatro al de la tarde.

La **configuración específica de la flota empleada en el experimento** se muestra en la Tabla 6.14. Incluye información sobre la capacidad de transporte de pasajeros y usuarios en silla de ruedas, el tipo de rampa disponible y la asignación de cada vehículo a uno de los dos turnos operativos. Esta distribución fue diseñada exclusivamente para este escenario simulado de escalabilidad, y no refleja necesariamente la asignación real utilizada por MIDES en su planificación original.

Tabla 6.14: Flota de vehículos y configuración utilizada en el experimento.

Identificador	Cap. Sillas Ruedas	Cap. Asientos	Turno ¹	Rampa ²
SBH 9074	4	5	Mañana	Manual
SBH 2740	4	5	Mañana	Eléctrica
SCQ 4726	5	5	Mañana	Manual
SCQ 5832	4	5	Mañana	Eléctrica
SCQ 6147	4	6	Tarde	Manual
SCQ 7259	4	5	Tarde	Eléctrica
SCQ 8374	5	5	Tarde	Manual
SCQ 9485	4	6	Tarde	Manual

¹ Los turnos asignados (Mañana/Tarde) corresponden a la configuración del experimento. No se dispone de información sobre cómo MIDES distribuyó los vehículos en la planificación manual original.

² El tipo de rampa es una restricción crítica. Las solicitudes que requieren rampa eléctrica solo pueden ser asignadas a vehículos con dicha característica.

Este escenario no solo permite evaluar la escalabilidad del algoritmo, sino que también proporciona información relevante sobre su capacidad para mantener tiempos de cómputo razonables y soluciones de calidad ante condiciones operativas más exigentes. El informe completo de planificación correspondiente a este experimento se presenta en el **Anexo B.3**.

Evaluación Cuantitativa de Métricas Clave

El rendimiento del sistema en este escenario de alta demanda se evaluó utilizando las mismas métricas que en los casos anteriores, haciendo énfasis en la eficiencia operativa, el tiempo de cómputo y la calidad del servicio ofrecido.

Eficiencia Operativa La Tabla 6.15 resume las métricas de distancia total recorrida y el tiempo de uso para cada uno de los ocho vehículos utilizados.

Tabla 6.15: Métricas de Eficiencia - Escenario de Escalabilidad.

Vehículo	Distancia Total Recorrida (km)	Tiempo de Uso (hh:mm)
SBH 2740 (PEUGEOT Boxer, 2014)	133	7:43
SCQ 4726 (MERCEDES BENZ Sprinter, 2020)	139	7:57
SCQ 5832 (TOYOTA HiAce, 2021)	153	7:55
SBH 9074 (MERCEDES BENZ Sprinter, 2009)	149	7:50
SCQ 6147 (VOLKSWAGEN Crafter, 2022)	125	6:04
SCQ 8374 (RENAULT Master, 2022)	119	5:29
SCQ 9485 (IVECO Daily, 2023)	116	6:04
SCQ 7259 (FIAT Ducato, 2021)	144	5:39
Total	1.078	54:41

A pesar de contar con una flota significativamente mayor, la alta densidad de solicitudes provocó que el sistema no pudiera cubrir la totalidad de la demanda. En este escenario, un total de **27 usuarios** quedaron sin atender, lo que corresponde a **49 viajes** individuales no asignados. Este resultado subraya que, incluso con una optimización eficiente, la capacidad de la flota sigue siendo el principal factor limitante del servicio.

Rendimiento Computacional El tiempo de cómputo para resolver este problema de mayor escala es un indicador clave de la viabilidad del sistema. A pesar de que el número de solicitudes se multiplicó por más de tres y la flota se duplicó, el rendimiento se mantuvo dentro de un rango operativo excelente.

Tabla 6.16: Tiempo de Generación - Planificación de Escalabilidad.

Tipo de Planificación	Tiempo de Generación
Optimizada (100 solicitudes, 8 vehículos)	menos de 1 minuto

La capacidad del sistema para generar una planificación completa para 100 solicitudes en el mismo tiempo que los experimentos anteriores demuestra su robustez y escalabilidad computacional, garantizando que no se convertirá en un cuello de botella incluso si el servicio se expande considerablemente en el futuro.

Calidad del Servicio La Tabla 6.17 detalla las métricas de calidad para los viajes que sí fueron asignados. Como en los casos anteriores, el sistema garantiza el cumplimiento de todas las restricciones temporales.

Tabla 6.17: Métricas de Calidad de Servicio - Planificación de Escalabilidad.

Vehículo	Viajes Asignados*	Cumplimiento ventanas	Tiempo Espera Prom. (min)**
SBH 2740 (PEUGEOT Boxer, 2014)	12	100 % (por diseño)	7.36
SCQ 4726 (MERCEDES BENZ, 2020)	17	100 % (por diseño)	7.00
SCQ 5832 (TOYOTA HiAce, 2021)	16	100 % (por diseño)	9.31
SBH 9074 (MERCEDES BENZ, 2009)	14	100 % (por diseño)	10.50
SCQ 6147 (VOLKSWAGEN Crafter, 2022)	13	100 % (por diseño)	6.15
SCQ 8374 (RENAULT Master, 2022)	8	100 % (por diseño)	7.25
SCQ 9485 (IVECO Daily, 2023)	11	100 % (por diseño)	5.82
SCQ 7259 (FIAT Ducato, 2021)	10	100 % (por diseño)	2.40

* Cada tramo individual (ej. una ida o una vuelta) se contabiliza como un viaje asignado.

** Tiempo de espera desde el inicio de la ventana de disponibilidad hasta la recogida/llegada efectiva, promediado entre todas las ventanas.

Los resultados de este análisis de escalabilidad son positivos. El sistema demostró ser capaz de gestionar un problema de tamaño considerable, produciendo una solución de alta calidad en un tiempo computacional muy bajo. Al mismo tiempo, el análisis cuantitativo de los viajes no atendidos ofrece información valiosa para la planificación estratégica, ya que permite estimar las necesidades de recursos (en este caso, vehículos) para satisfacer futuros niveles de demanda. La notable variación en la carga de trabajo (desde 8 hasta 17 viajes por vehículo) refuerza la conclusión anterior sobre la necesidad de explorar mecanismos de balanceo de carga como una futura línea de mejora.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

7.1. Conclusiones

7.1.1. Síntesis de resultados y logros

En las pruebas de escalabilidad demostró manejar escenarios con hasta el triple de la demanda diaria actual sin alcanzar su límite de capacidad. El análisis de viajes no atendidos reveló además una variación de carga de 8 a 17 viajes por vehículo, lo que confirma la necesidad de estrategias de balanceo para distribuir el trabajo equitativamente entre la flota.

El desarrollo de este sistema permitió abordar un problema real con impacto directo en la operativa diaria del Sistema de Transporte Accesible del MIDES, mejorando sustancialmente el proceso de planificación de traslados asistidos. La herramienta consiguió reducir el tiempo de planificación —que antes tomaba varias horas— a menos de un minuto, generando rutas factibles que incluso atienden a más usuarios con los mismos recursos y cumplen todas las restricciones operativas por diseño.

En las pruebas de escalabilidad demostró manejar escenarios con hasta el triple de la demanda diaria actual sin alcanzar su límite de capacidad. El análisis de viajes no atendidos reveló además una variación de carga de 8 a 17 viajes por vehículo, lo que confirma la necesidad de estrategias de balanceo para distribuir el trabajo equitativamente entre la flota.

A lo largo del proyecto se lograron cumplir los objetivos propuestos, construyendo una solución modular, intuitiva y funcional, que integra diversas tecnologías modernas y bibliotecas especializadas.

La arquitectura planteada, basada en la separación de frontend, backend y motor de optimización, demostró ser adecuada para los requerimientos del sistema, facilitando el trabajo en paralelo, la escalabilidad y el mantenimiento futuro. La validación con el cliente permitió detectar tempranamente aspectos

de usabilidad que fueron corregidos, lo que contribuyó a una mayor aceptación del sistema.

7.1.2. Logros alcanzados

Entre los principales logros del proyecto se destacan:

- Implementación completa de una herramienta de planificación de traslados con georreferenciación y optimización automática de rutas.
- Desarrollo de una interfaz amigable, validada con los usuarios reales, que facilita la creación de solicitudes y planificaciones.
- Integración del sistema con la biblioteca Leaflet para la incorporación de mapas y para la selección manual de ubicaciones en estos.
- Integración con la API Nominatim de OpenStreetMap para la geocodificación de direcciones.
- Integración con el servicio OSRM para la obtención de matrices de costo y generación de geometrías de las rutas.
- Integración con la biblioteca OR-Tools de Google para la optimización de rutas.
- Modelado robusto de datos, con validaciones automáticas, integridad referencial y soporte para crecimiento futuro.
- Validación empírica sobre datos reales que muestra mejoras significativas respecto a la planificación manual.
- Base metodológica y métricas que facilitan la futura evaluación continua del servicio.

7.1.3. Limitaciones del sistema y dificultades encontradas

- No se implementó un módulo de seguimiento en tiempo real de los vehículos y rutas, confirmación de visitas ni una aplicación móvil.
- La planificación se realiza de forma estática; los cambios operativos posteriores (cancelaciones, retrasos) deben gestionarse manualmente.
- La coexistencia de React y Vue en el frontend, provocada por un malentendido con el cliente, añade complejidad de mantenimiento futuro.

7.2. Trabajo futuro

En base al análisis realizado y las conversaciones mantenidas con el cliente, se identificaron varias posibles líneas de desarrollo futuro:

- Incorporar un módulo de seguimiento en tiempo real que permita ver el estado de cumplimiento de las rutas y la ubicación de los vehículos.
- Desarrollar una aplicación móvil, para el uso de los choferes, que permita confirmar el cumplimiento de las solicitudes asignadas.
- Implementar la funcionalidad de roles de usuarios, para distinguir los permisos de un usuario de la aplicación web y uno de la aplicación móvil.
- Agregar funcionalidad para reoptimización dinámica ante cambios durante la jornada.
- Agregar priorización de pedidos, manual y automática, para aumentarle la probabilidad de ser atendidos a usuarios que no lo hayan sido en sus últimas solicitudes.
- Habilitar exportación de reportes con más formatos y automatizar su envío por correo electrónico.
- Evaluar el uso de motores de geocodificación offline para mayor independencia de servicios externos.

Referencias

- Applegate, D. L., Bixby, R. E., Chvátal, V., y Cook, W. J. (2007). *The traveling salesman problem: A computational study*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Arcgis – esri’s mapping and analytics platform. (s.f.). <https://www.arcgis.com>.
- Asp.net. (s.f.). <https://dotnet.microsoft.com/en-us/apps/aspnet>.
- Baldacci, R., Battarra, M., y Vigo, D. (2007). Routing a heterogeneous fleet of vehicles. En *The vehicle routing problem: Latest advances and new challenges* (Vol. 43). Springer. doi: 10.1007/978-0-387-77778-8_1
- Baldacci, R., Mingozzi, A., y Roberti, R. (2011). New route relaxation and pricing strategies for the vehicle routing problem. *Operations Research*, 59(5), 1269–1283. doi: 10.1287/opre.1110.0975
- Beck et al. (2001). *Manifesto for agile software development*. <https://agilemanifesto.org>.
- Bullheimer, B., Hartl, R. F., y Strauss, C. (1997). An improved ant system algorithm for the vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, 89, 319–328. doi: 10.1023/A:1018940026670
- Chiang, W.-C., y Russell, R. A. (1996). Simulated annealing metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows. *Annals of Operations Research*, 63, 3–27. doi: 10.1007/BF02601637
- Citizens Budget Commission. (2020). *Testimony on the mta’s access-a-ride program*. <https://cbcny.org/advocacy/testimony-mtas-access-ride-program>. (Accedido: 10-sept-2025)
- Clarke, G., y Wright, J. W. (1962). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4), 568–581. doi: 10.1287/opre.12.4.568
- Cordeau, J.-F., y Laporte, G. (2003). The dial-a-ride problem (darp): Variants, modeling issues and algorithms. *4OR*, 1(2), 89–101. doi: 10.1007/s10288-002-0009-8
- Cordeau, J.-F., y Laporte, G. (2007). The dial-a-ride problem: Models and algorithms. *Annals of Operations Research*, 153(1), 29–46. doi: 10.1007/s10479-007-0170-8
- Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., y Tadei, R. (2012). Grasp with path relinking for the two-echelon vehicle routing problem. En *Advances in metaheuristics* (Vol. 53, pp. 113–125). Springer.

- Django – the web framework for perfectionists with deadlines.* (s.f.). <https://www.djangoproject.com>.
- Dullaert, W., Janssens, G. K., Sörensen, K., y Vernimmen, B. (2002). New heuristics for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 53(11), 1231–1238. doi: 10.1057/palgrave.jors.2601422
- et al., E. Y. (s.f.). *Vue.js – the progressive javascript framework.* <https://vuejs.org>.
- Fielding, R. T. (2000). *Architectural styles and the design of network-based software architectures.* <https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm>.
- Garey, M. R., y Johnson, D. S. (1979). *Computers and intractability: A guide to the theory of np-completeness.* San Francisco: W. H. Freeman.
- Gendreau, M., Hertz, A., y Laporte, G. (1994). A *Tabu Search* heuristic for the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*, 29(2), 167–178. doi: 10.1287/trsc.29.2.167
- Gendreau, M., y Potvin, J.-Y. (2010). *Handbook of metaheuristics* (2nd ed.).
- Google. (2025). *Or-tools: Google’s operations research tools.* <https://developers.google.com/optimization>.
- Google LLC. (s.f.). *Or-tools: Open source software suite for optimization.* <https://developers.google.com/optimization>.
- Gutin, G., y Punnen, A. P. (2014). *The traveling salesman problem and its variations.* Boston, MA: Springer. doi: 10.1007/978-1-4757-3550-1
- Jira software.* (2025). <https://www.atlassian.com/software/jira>.
- Json web tokens (jwt).* (s.f.). <https://jwt.io>.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., y Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671–680. doi: 10.1126/science.220.4598.671
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345–358.
- Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43(4), 408–416. doi: 10.1287/trsc.1090.0301
- Leaflet – an open-source javascript library for interactive maps.* (s.f.). <https://leafletjs.com>.
- Lenstra, J. K., y Rinnooy Kan, A. H. G. (1979). Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2), 221–227. doi: 10.1002/net.3230110211
- Lin, S. (1965). Computer solutions of the traveling salesman problem. *Bell System Technical Journal*, 44(10), 2245–2269. doi: 10.1002/j.1538-7305.1965.tb04146.x
- Lin, S., y Kernighan, B. W. (1971). An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem. *Operations Research*, 21(2), 498–516. doi: 10.1287/opre.21.2.498
- Meta. (s.f.). *React – a javascript library for building user interfaces.* <https://react.dev>.

- Mitchell, S. (2011). Pulp: A python linear programming api. En *Proceedings of the 9th python in science conference (scipy)* (pp. 65–70). Descargado de <https://coin-or.github.io/pulp/>
- Mladenović, N., y Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, *24*(11), 1097–1100.
- Nominatim – search tool for openstreetmap data. (s.f.). <https://nominatim.org>.
- Osrm – open source routing machine. (s.f.). <http://project-osrm.org/>.
- Parragh, S. N., Doerner, K. F., y Hartl, R. F. (2008). A survey on pickup and delivery problems: Part ii—transportation between pickup and delivery locations. *Journal für Betriebswirtschaft*, *58*(2), 81–117. doi: 10.1007/s11301-008-0036-4
- Postgis – spatial and geographic objects for postgresql. (s.f.). <https://postgis.net>.
- PostgreSQL Global Development Group. (2025). *Postgresql*. <https://www.postgresql.org/>.
- Potvin, J.-Y., y Rousseau, J.-M. (1993). A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, *66*(3), 331–340. doi: 10.1016/0377-2217(93)90329-W
- Potvin, J.-Y., y Rousseau, J.-M. (1995). An exchange heuristic for routing problems with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, *46*(12), 1433–1446.
- Pulp – a python library for linear optimization. (s.f.). <https://coin-or.github.io/pulp>.
- Ramírez, S. (s.f.). *Fastapi – fast (high-performance), web framework for building apis with python*. <https://fastapi.tiangolo.com>.
- Ronacher, A. (s.f.). *Flask – python micro web framework*. <https://flask.palletsprojects.com>.
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, *35*(2), 254–265. doi: 10.1287/opre.35.2.254
- Swagger – open source tools for apis. (s.f.). <https://swagger.io>.
- Torvalds, L. (2025). *Git: the distributed version control system*. <https://git-scm.com>.
- Toth, P., y Vigo, D. (Eds.). (2014). *Vehicle routing: Problems, methods, and applications* (2.^a ed.). Philadelphia, PA: SIAM.
- Transport for London. (2023). *London dial-a-ride service overview*. <https://madeby.tfl.gov.uk/2023/11/24/london-dial-a-ride/>. (Accedido: 10-sept-2025)
- Valhalla. (s.f.). *Valhalla: an open source routing engine*. <https://valhalla.github.io/valhalla/api/turn-by-turn/overview/>.
- Wiecek, B. (2011). Parallel independent simulated annealing searches to solve the vrptw. En *Man-machine interactions 2* (Vol. 103, pp. 377–384). Springer. doi: 10.1007/978-3-642-23169-8_41

Anexo A

Análisis Detallado de Metaheurísticas y Estrategias de Solución Inicial

En este anexo se presentan los datos brutos completos obtenidos del análisis comparativo de las estrategias de optimización, tal como se describe en la Sección 6.3. El experimento consistió en 84 ejecuciones, cruzando 14 estrategias de solución inicial con 6 metaheurísticas de búsqueda local sobre un escenario de alta complejidad. Las siguientes tablas detallan los resultados de cada combinación.

A.1. Resultados Completos de las 84 Combinaciones

La Tabla A.1 muestra el resultado de las pruebas que tuvieron éxito de las 84 pruebas, resumiendo las restantes por falta de espacio y de relevancia. Se destaca si cada combinación fue capaz de encontrar una solución factible, el tiempo de cómputo, y el número de viajes atendidos versus descartados.

A.1.1. Descripción de las Métricas

Metaheurística Algoritmo de búsqueda local utilizado para mejorar la solución inicial.

Estrategia de Sol. Inicial Método utilizado para construir la solución inicial del problema.

Tabla A.1: Resumen de Resultados por Combinación de Estrategias

Metaheurística	Estrategia	Encontró Solución	Tiempo (s)	Viajes Descartados	Viajes Atendidos	Eficiencia (%)
AUTOMÁTIC	PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION	Sí	11.507	12	39	78.0
	PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION	Sí	3.619	12	39	78.0
	PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION	Sí	30.236	12	39	78.0
	PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION	Sí	30.251	12	39	78.0
	PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION	Sí	31.422	12	39	78.0
	PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION	Sí	30.017	12	39	78.0
	AUTOMÁTIC	Sí	2.735	12	39	78.0
	AUTOMÁTIC	Sí	3.549	12	39	78.0
	AUTOMÁTIC	Sí	30.024	12	39	78.0
	AUTOMÁTIC	Sí	30.029	12	39	78.0
TABU_SEARCH	AUTOMÁTIC	Sí	30.017	12	39	78.0
	AUTOMÁTIC	Sí	30.005	12	39	78.0
	LOCAL_CHEAPEST_INSERTION	Sí	30.133	9	41	82.0
	LOCAL_CHEAPEST_INSERTION	Sí	2.486	12	39	78.0
	LOCAL_CHEAPEST_INSERTION	Sí	2.532	12	39	78.0
	LOCAL_CHEAPEST_INSERTION	Sí	30.069	12	39	78.0
	LOCAL_CHEAPEST_INSERTION	Sí	30.069	12	39	78.0
	LOCAL_CHEAPEST_INSERTION	Sí	30.021	12	39	78.0
	SAVINGS	Sí	30.015	11	40	80.0
	SAVINGS	Sí	3.689	14	37	74.0
GREEDY_DESCENT	SAVINGS	Sí	3.401	14	37	74.0
	SAVINGS	Sí	30.013	14	37	74.0
	SAVINGS	Sí	30.014	14	37	74.0
	SAVINGS	Sí	30.013	14	37	74.0
	ALL_UNPERFORMED	Sí	30.013	14	37	74.0
	ALL_UNPERFORMED	Sí	30.076	12	39	78.0
	ALL_UNPERFORMED	Sí	3.010	14	37	74.0
	ALL_UNPERFORMED	Sí	3.114	14	37	74.0
	ALL_UNPERFORMED	Sí	30.057	14	37	74.0
	ALL_UNPERFORMED	Sí	30.078	14	37	74.0
TABU_SEARCH	ALL_UNPERFORMED	Sí	30.008	14	37	74.0
	GLOBAL_CHEAPEST_ARC	Sí	30.015	12	39	78.0
	GLOBAL_CHEAPEST_ARC	Sí	5.604	14	37	74.0
	GLOBAL_CHEAPEST_ARC	Sí	3.007	14	37	74.0
	GLOBAL_CHEAPEST_ARC	Sí	30.019	14	37	74.0
	GLOBAL_CHEAPEST_ARC	Sí	30.014	14	37	74.0
	GLOBAL_CHEAPEST_ARC	Sí	30.022	14	37	74.0
	BEST_INSERTION	Sí	19.251	13	38	76.0
	BEST_INSERTION	Sí	8.876	13	37	74.0
	BEST_INSERTION	Sí	30.058	13	37	74.0
BEST_INSERTION	Sí	30.055	13	37	74.0	
BEST_INSERTION	Sí	30.061	13	37	74.0	
BEST_INSERTION	Sí	30.009	13	37	74.0	

Para las estrategias PATH_CHEAPEST_ARC, PATH_MOST_CONSTRAINED_ARC, EVALUATOR_STRATEGY, SWEEP, CHRISTOFIDES, LOCAL_CHEAPEST_ARC, FIRST_UMBOUND_MIN_VALUE, ninguna metaheurística encontró solución (Tiempo límite alcanzado: 50 viajes descartados, 0 atendidos).

Encontró Solución Indica si el algoritmo logró encontrar una solución factible (Sí/No).

Tiempo (s) Tiempo de ejecución del algoritmo en segundos.

Viajes Descartados Número de viajes que no pudieron ser asignados a ninguna ruta.

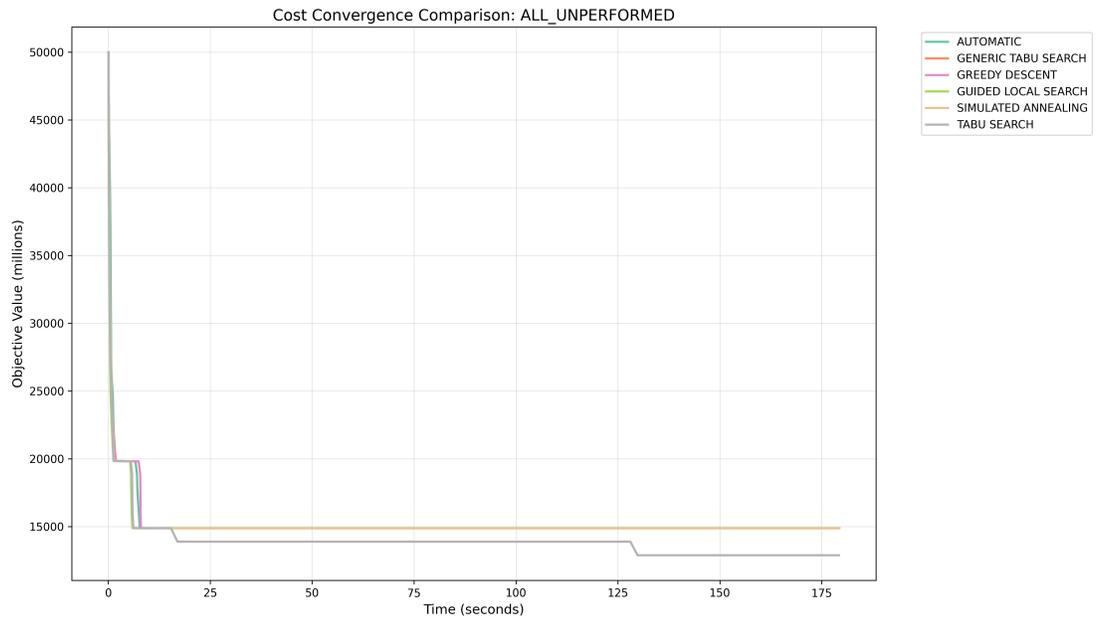
Eficiencia (%) Porcentaje de viajes atendidos respecto al total de viajes solicitados.

A.1.2. Análisis de Convergencia en el Tiempo

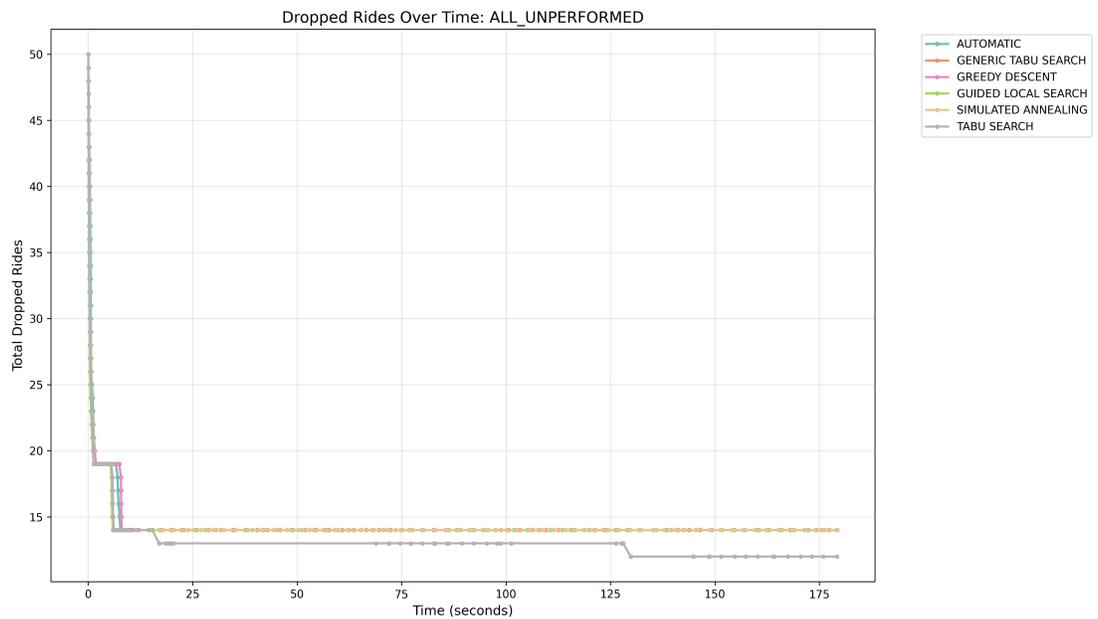
Posteriormente, se realizó un análisis más profundo sobre las 7 estrategias de solución inicial más prometedoras, identificadas en la tabla anterior. Para ello, se extendió el límite de tiempo de ejecución a 180 segundos (3 minutos), con el fin de observar cómo progresa la calidad de la solución con más tiempo de cómputo y así definir un límite adecuado para el solver de OR-Tools en la implementación final.

Para cada una de estas 7 estrategias, se graficó la evolución de la solución. Específicamente, cada vez que el solver encontraba una nueva solución, se registraba el costo (función objetivo que se busca minimizar) y la cantidad de viajes descartados (que también se busca minimizar). Las siguientes figuras muestran estos resultados, permitiendo una comparación visual del rendimiento de las distintas metaheurísticas a lo largo del tiempo.

Estrategia ALL_UNPERFORMED



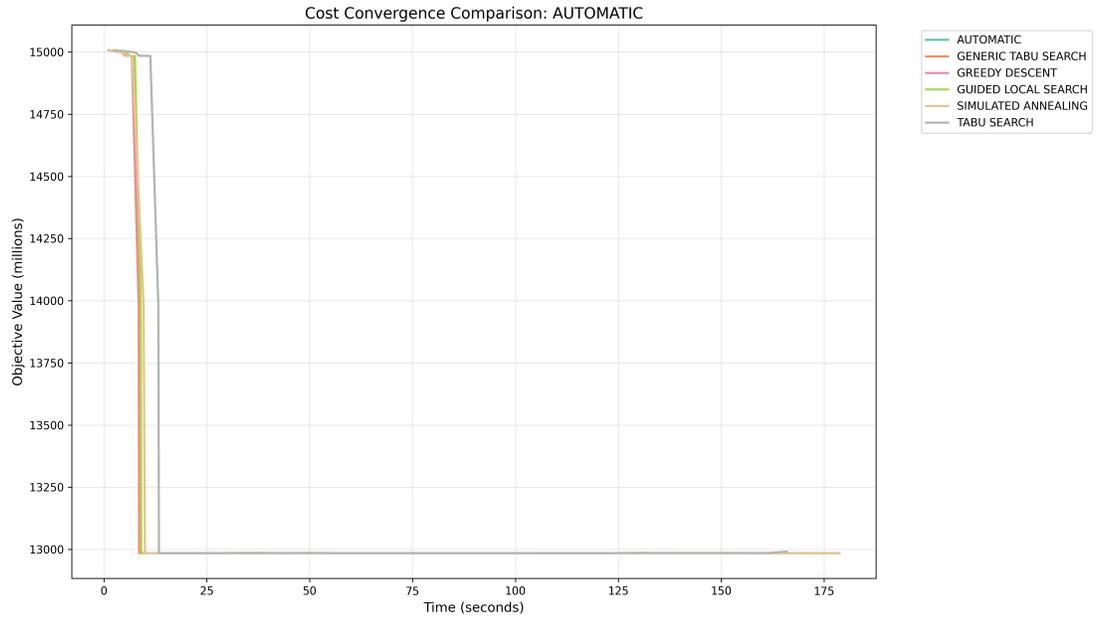
(a) Convergencia del costo



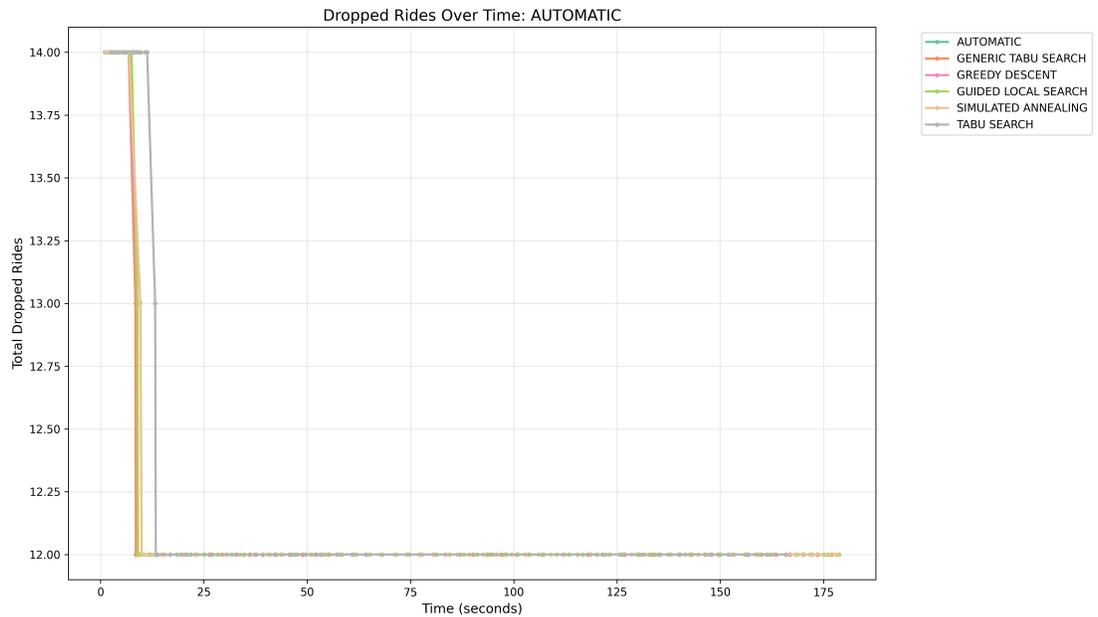
(b) Evolución de los viajes descartados

Figura A.1: Comparativa de rendimiento de las metaheurísticas con la solución inicial ALLUNPERFORMED

Estrategia AUTOMATIC



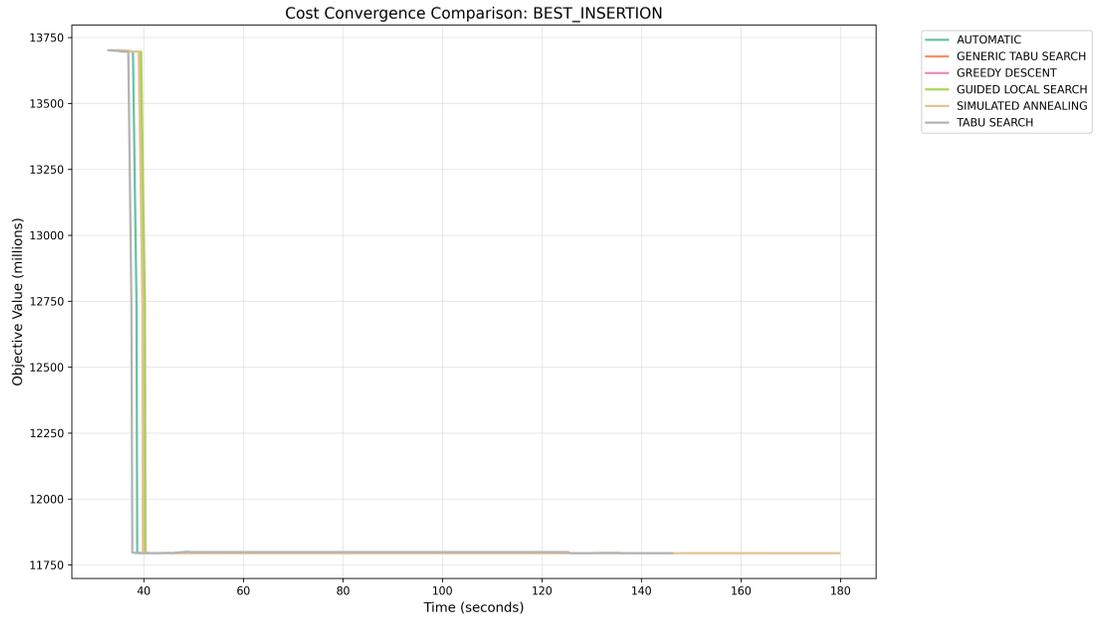
(a) Convergencia del costo



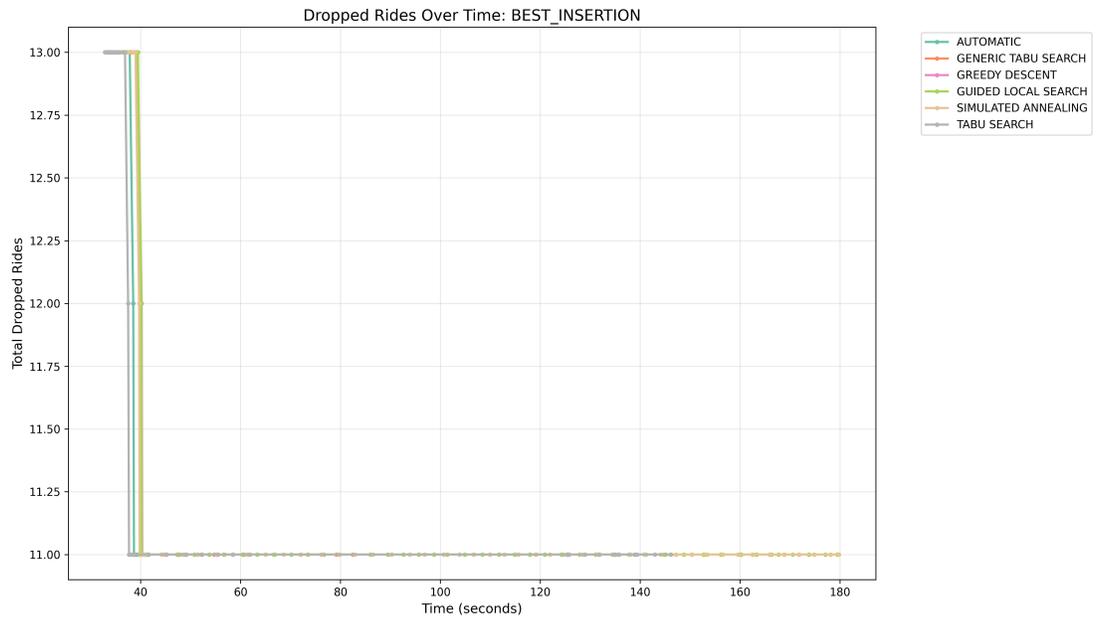
(b) Evolución de los viajes descartados

Figura A.2: Comparativa de rendimiento de las metaheurísticas con la solución inicial AUTOMATIC

Estrategia BEST_INSERTION



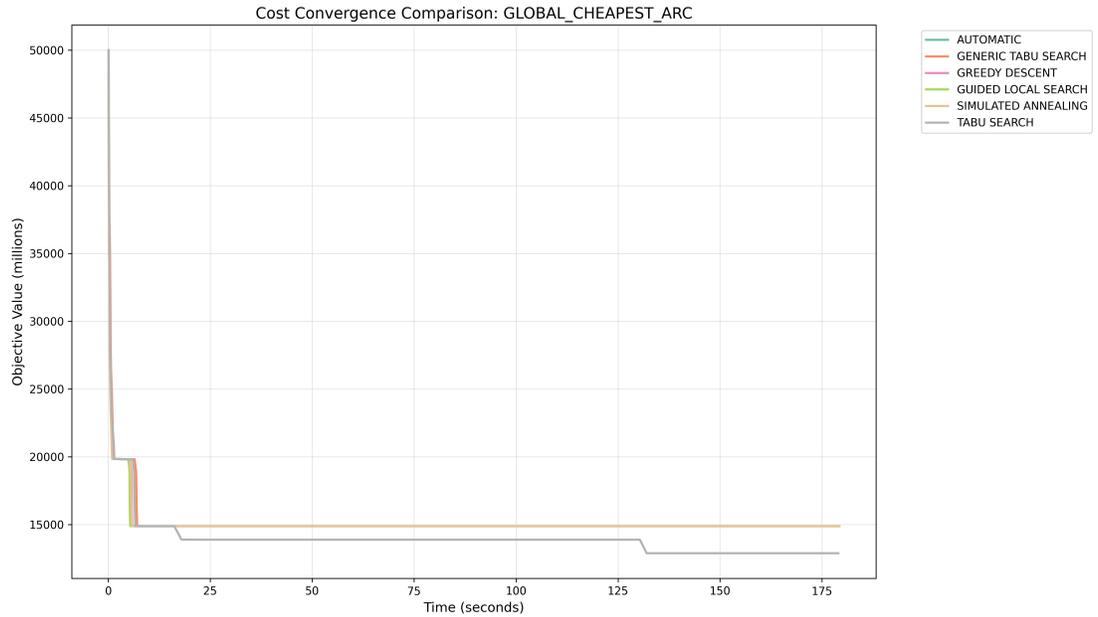
(a) Convergencia del costo



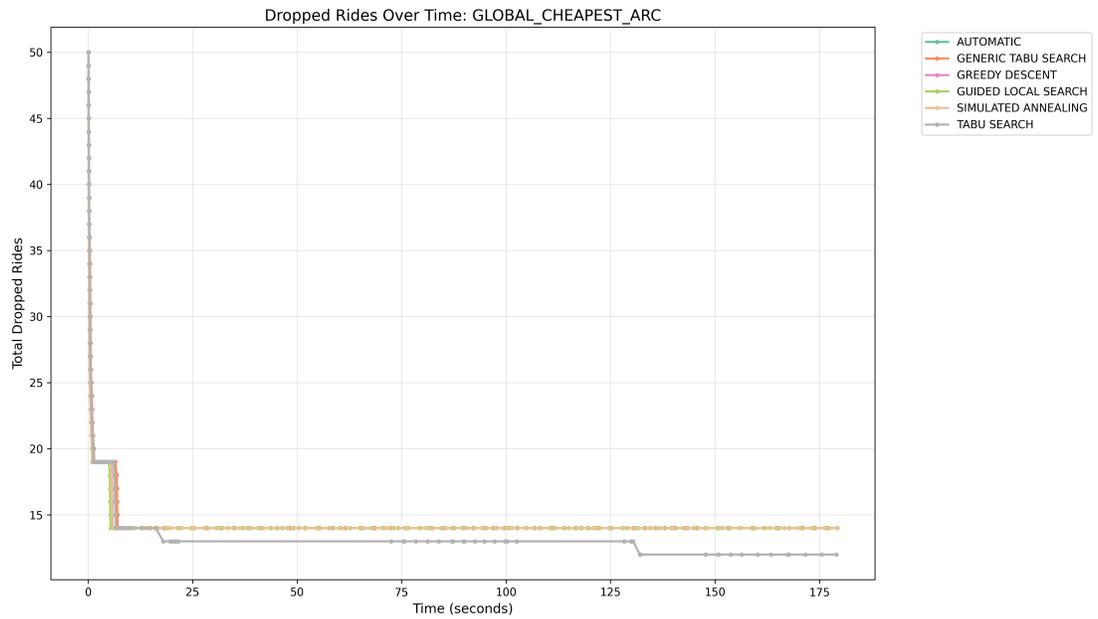
(b) Evolución de los viajes descartados

Figura A.3: Comparativa de rendimiento de las metaheurísticas con la solución inicial BEST_INSERTION

Estrategia GLOBAL_CHEAPEST_ARC



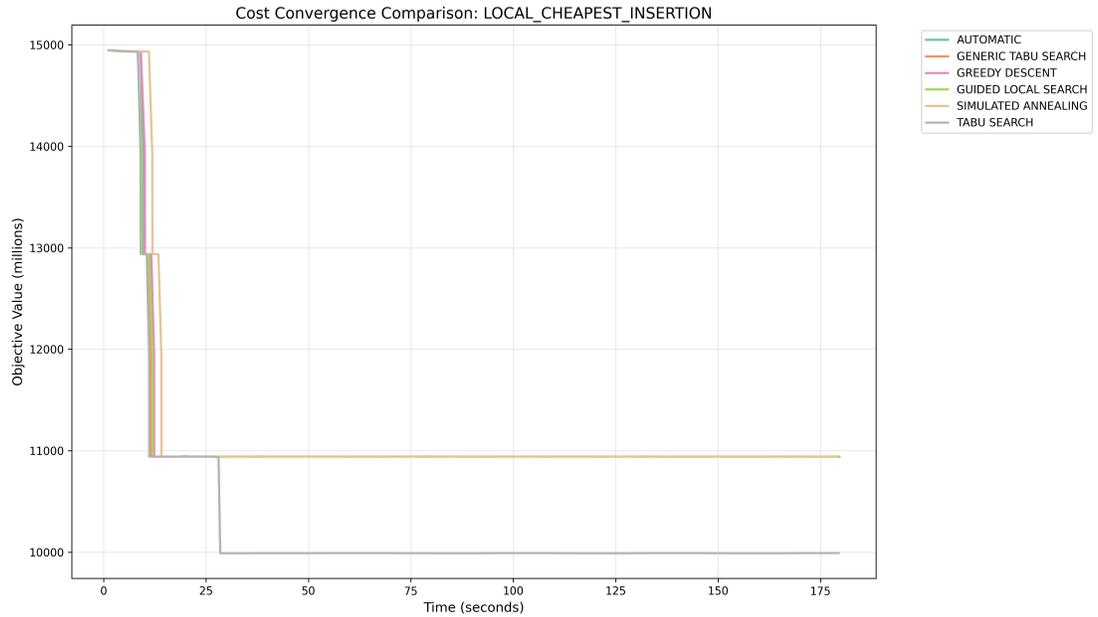
(a) Convergencia del costo



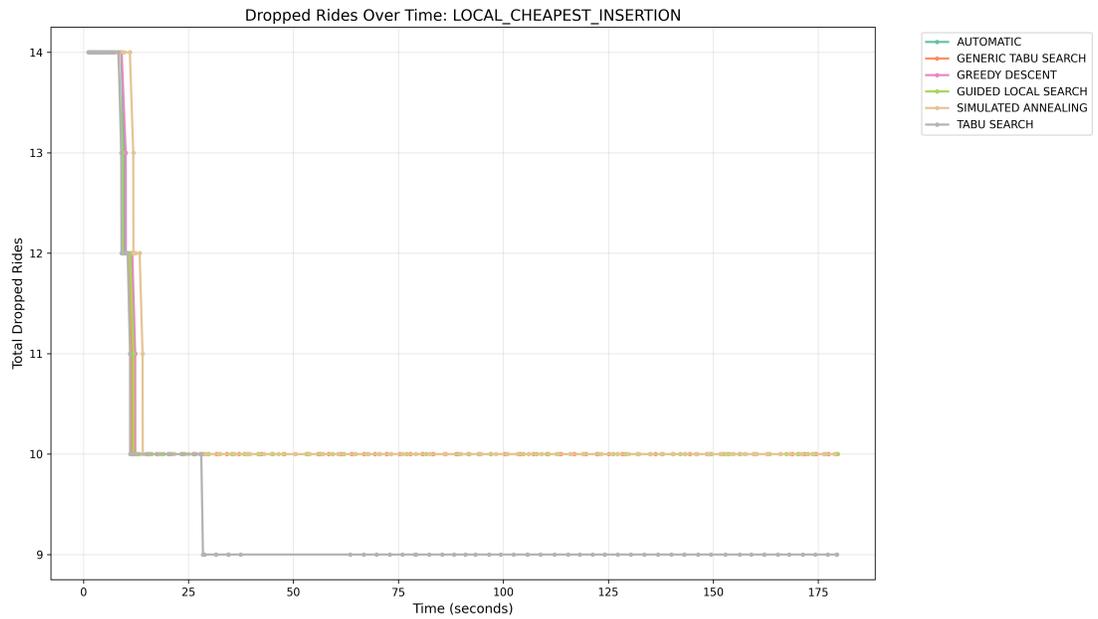
(b) Evolución de los viajes descartados

Figura A.4: Comparativa de rendimiento de las metaheurísticas con la solución inicial GLOBAL_CHEAPEST_ARC

Estrategia LOCAL_CHEAPEST_INSERTION



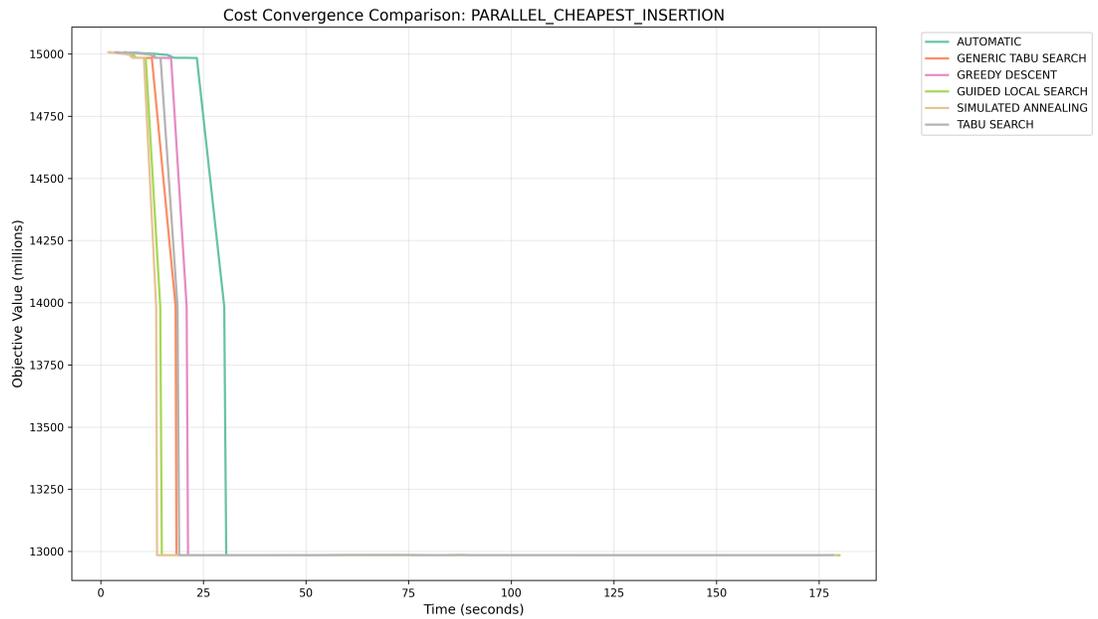
(a) Convergencia del costo



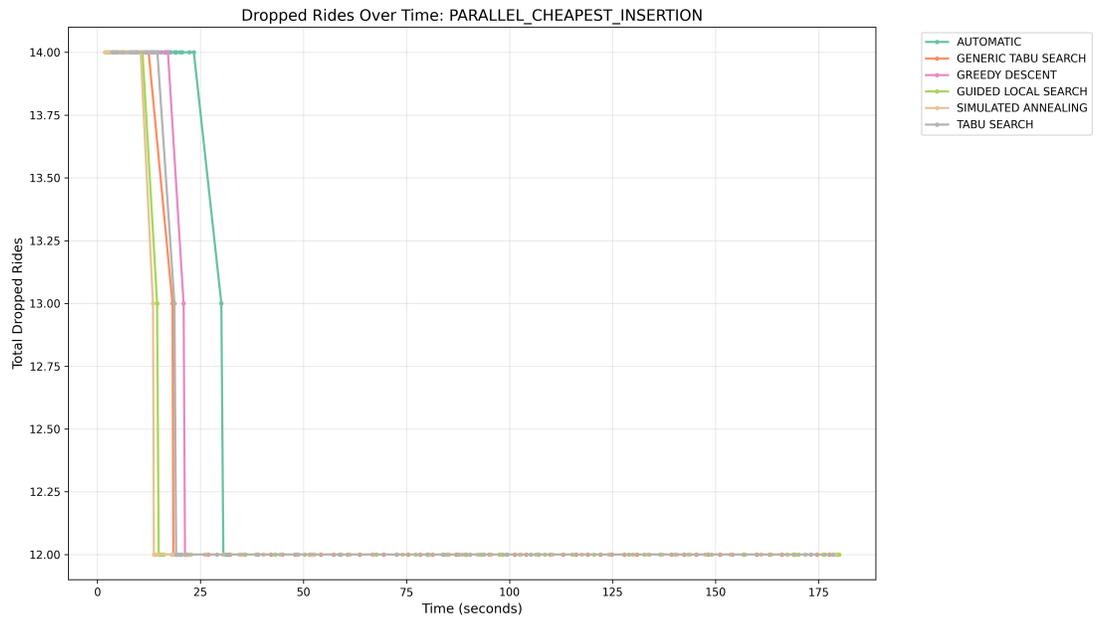
(b) Evolución de los viajes descartados

Figura A.5: Comparativa de rendimiento de las metaheurísticas con la solución inicial LOCAL_CHEAPEST_INSERTION

Estrategia PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION



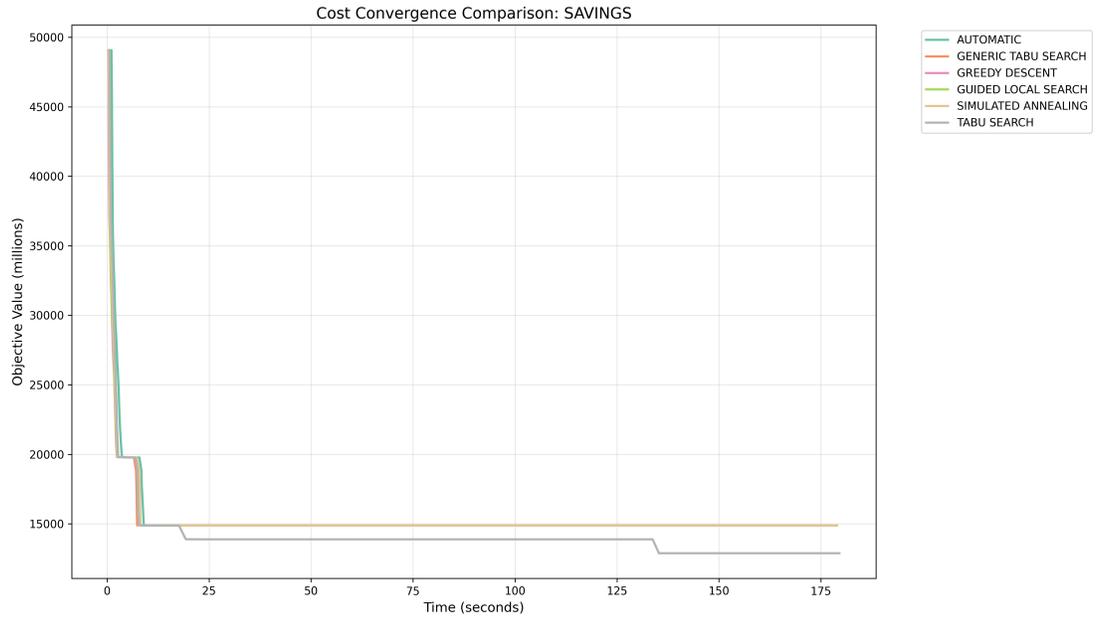
(a) Convergencia del costo



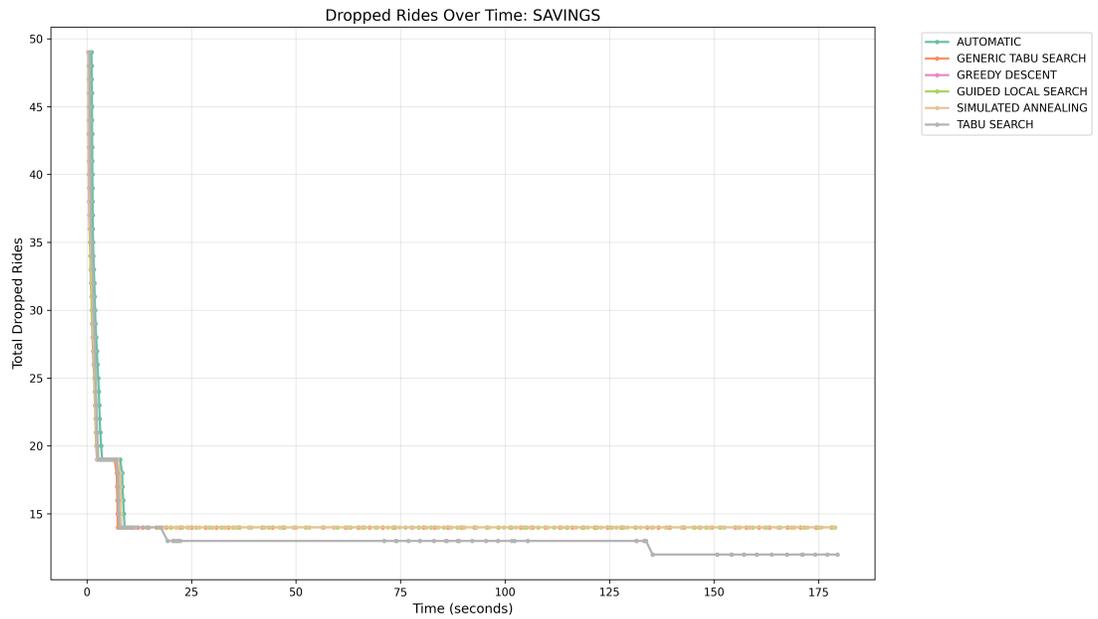
(b) Evolución de los viajes descartados

Figura A.6: Comparativa de rendimiento de las metaheurísticas con la solución inicial PARALLEL_CHEAPEST_INSERTION

Estrategia SAVINGS



(a) Convergencia del costo



(b) Evolución de los viajes descartados

Figura A.7: Comparativa de rendimiento de las metaheurísticas con la solución inicial SAVINGS

Anexo B

Informes de Planificación Generados

En este anexo se presentan las hojas de ruta completas generadas durante los experimentos con casos reales, tanto para la planificación manual de MIDES como para las soluciones obtenidas con el sistema optimizador. La planificación para ese día contaba con 29 pedidos de Usuarios, para un total de 50 viajes(1 viaje equivale a 1 viaje de ida o de vuelta).

B.1. Comparativa: Planificación Manual vs. Optimizada

A continuación se muestran los informes correspondientes al **Caso de Estudio Real** sin requisitos de accesibilidad, permitiendo una comparación directa entre la planificación original y la optimizada.

Anexo A.1: Planificación manual MIDES

C.N.H.D.	Orden: Turno + Móvil + Hora	lunes 18/nov/2024	27/nov/24 10:50
----------	-----------------------------	--------------------------	-----------------

Chofer_1 K2 Mañana Viajes: 11

Hora	Nombre	Apellido	Dirección	Destino	Teléfono	HMax.
07:00	Usuario	06	ALBANIA 3680 E. ALSACIA Y C. NERY	RINCON 575 TRABAJO		09:00
07:10	Usuario	02	CENTRO ARTIGAS	H. CLINICAS		09:00
NO CONCORRE A TRABAJAR						
07:10	Usuario	03	CENTRO ARTIGAS	H. CLINICAS		09:00
07:10	Usuario	04	CENTRO ARTIGAS	H. CLINICAS		09:00
07:35	Usuario	05	ETNA 5958	MEC		08:00
VAS AL CLINICAS						
08:05	Usuario	07	SECCO ILLA 2818	RINCON 640 BID		09:00
DEJAS A Usuario_05, Usuario_06 Y Usuario_07						
08:35	Usuario	08	25 DE MAYO 177 AP2 E MACIEL	CASTRO Y PENA		09:00
09:00	Usuario	09	J.CASTRO 4424	CASTRO Y PENA		09:00
09:10	Usuario	10	L. BATLLE BERRES 3975 E LUIS DE LA PEÑA	CASTRO Y PENA		09:00
VAS A CASTRO						
09:50	Usuario	11	PASAJE DENIS 3444 E CAPURRO	MEC		10:00
LA LLEVAS						
12:00	Usuario	09	CASTRO Y PENA	J.CASTRO 4424		12:00
DEJAS A Usuario_09						

Chofer_2 K4 Mañana Viajes: 11

Hora	Nombre	Apellido	Dirección	Destino	Teléfono	HMax.
07:00	Usuario	13	LAFONE 2261 E. CIBILS	H. CLINICAS		08:00
LA LLEVAS						
08:00	Usuario	14	EUSEBIO CABRAL 4250 E F MAGARIÑOS	MAR DEL PLATA		08:00
08:25	Usuario	15	BUSTAMANTE Y GUERRA 2666 AP 1 (A PARTIR DE NOV)	MAR DEL PLATA Y PEDRO FIGARI		08:00
08:45	Usuario	16	A. DUFORT Y ALVAREZ 3217 AP 2 E HERMANOS . GIL	MAR DEL PLATA		08:00
LOS LLEVAS A MAR DEL PLATA						
10:15	Usuario	18	FRAGUOSO DE RIVERA 1447 AP 2 E BAUZA	CENATT		11:00
LO LLEVAS A CENATT						
11:20	Usuario	02	H. CLINICAS	CENTRO ARTIGAS		12:00
11:20	Usuario	03	H. CLINICAS	CENTRO ARTIGAS		10:00
11:20	Usuario	04	H. CLINICAS	CENTRO ARTIGAS		10:00
11:21	Usuario	13	H. CLINICAS	LAFONE 2261 E. CIBILS		12:00
VAS AL CENTRO ARTIGAS						
11:45	Usuario	18	CENTRO ARTIGAS	H. PASTEUR		12:00
VAS AL PASTEUR LUEGO DEJAS A MARTA						
13:10	Usuario	17	CENATT	FRAGUOSO DE RIVERA 1447 AP 2 E BAUZA		13:00
CAMBIAS CON MIGUEL						

Chofer_3 K4 Tarde Viajes: 10 LLEVAS A PEROVICH

Hora	Nombre	Apellido	Dirección	Destino	Teléfono	HMax.
14:15	Usuario	18	H. PASTEUR	CENTRO ARTIGAS		13:30
LO LLEVAS						

C.N.H.D.	Orden: Turno + Móvil + Hora	lunes 18/nov/2024	27/nov/24 10:50
-----------------	------------------------------------	--------------------------	-----------------

15:00	Usuario	19	ESCUELA ROOSEVELT	BATLLE Y ORDOÑEZ 2462 E AZARA	16:00
15:10	Usuario	08	CASTRO Y PENA	25 DE MAYO 177 AP2 E MACIEL	15:00
15:11	Usuario	10	CASTRO Y PENA	L. BATLLE BERRES 3975 E LUIS DE LA PEÑA	15:00
LLEVAS Usuario_10 LUEGO A Usuario_08					
16:00	Usuario	05	MEC	ETNA 5958	14:00
16:01	Usuario	06	RINCON 575 TRABAJO	ALBANIA 3680 E. ALSACIA Y C. NERY	15:00
LLEVAS A Usuario_19, Usuario_05 Y Usuario_06					
17:30	Usuario	11	MEC	PASAJE DENIS 3444 E CAPURRO	16:00
17:40	Usuario	07	RINCON 640 BID	SECCO ILLA 2818	17:00
DEJAS A USUARIO_11 LUEGO USUARIO_07					
19:00	Usuario	14	MAR DEL PLATA	EUSEBIO CABRAL 4250 E F MAGARIÑOS	18:00
19:01	Usuario	20	MAR DEL PLATA (SOLO REGRESO)	TEOFILO DIAZ 1624 E AP. SARAVIA	18:00
LOS LLEVAS					

NO ASIGNADOS

Hora	Nombre	Apellido	Dirección	Destino	Teléfono	HMax.
:	Usuario	21	MILLAN 3135 AP 403	OSORIO 1370		08:00
:	Usuario	22	CENTRO ARTIGAS	CENTRO CACHON		09:00
:	Usuario	21	OSORIO 1370	MILLAN 3135 AP 403		11:30
:	Usuario	22	CENTRO CACHON	CENTRO ARTIGAS		12:00
:	Usuario	23	ESTEBAN GARINO 4035 E CONGREVE Y MAZARINO	ERNESTO CANTERO 802 ESCUELA 200		12:00
:	Usuario	24	TUCAN SOLAR 2 ESQ CNO GUERRA	MURILLO2644 E CAMPOAMOR		10:00
:	Usuario	24	MURILLO2644 E CAMPOAMOR	TUCAN SOLAR 2 ESQ CNO GUERRA		13:00
:	Usuario	25	P. CASTELINO 1590 E. R. MORETTI	MURILLO 2644 E CAMPOAMOR		10:00
:	Usuario	25	MURILLO 2644 E CAMPOAMOR	P. CASTELINO 1590 E. R. MORETTI		13:00
:	Usuario	26	SANTA LUCIA 4451 E GARZON	MURILLO 2644 E CAMPOAMOR		10:00
:	Usuario	26	MURILLO 2644 E CAMPOAMOR	SANTA LUCIA 4451 E GARZON		13:00
:	Usuario	27	CEIBAL Y PANDO	COOPERATIVA ZUNFELDE		18:00
:	Usuario	28	CARLOS DE LA VEGA 5514 E YUGOSLAVIA	JOAQUIN REQUENA 3010 E ENRIQUE MA		19:20
:	Usuario	29	FERRARI	MICHIGAN 1538 E DECROLLI		18:00
:	Usuario	30	L.A.DE HERRERA 1975/001 E. RCA.DEL SALVADOR Y MASINI	18 DE JULIO Y PABLO DE MARIA (IGLESIA)		14:30
:	Usuario	23	ERNESTO CANTERO 802 ESCUELA 200	ESTEBAN GARINO 4035 E CONGREVE Y MA		15:00
:	Usuario	30	18 DE JULIO Y PABLO DE MARIA (IGLESIA)	L.A.DE HERRERA 1975/001 E. RCA.DEL SAL		16:30
:	Usuario	31	MIDES 18 DE JULIO	PJE H 1681 E A SARAVIA Y ALBENIZ		17:00

Anexo A.1: Planificación generada por Sistema Optimizador

Planificación ID: 104 - Fecha: 18/11/2025

Ruta 1

Vehículo: SBH 2740 (PEUGEOT Boxer "Microbus" (año 2014))
Chofer: chofer_2 apellido_chofer_2
Hora Inicio: 06:25
Hora Fin: 13:49

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	06:25	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
---	06:38	---	Recoger a Usuario 16	Dufort y Álvarez 3217	N/A
---	06:48	---	Recoger a Usuario 15	BUSTAMANTE Y GUERRA 2666	N/A
---	07:06	---	Recoger a Usuario 22	Cno. Maldonado 5745	N/A
07:30	07:30	08:00	Dejar a Usuario 16	MAR DEL PLATA	N/A
07:30	07:32	08:00	Dejar a Usuario 15	MAR DEL PLATA	N/A
---	08:06	---	Recoger a Usuario 09	JOSE CASTRO 4424	N/A
---	08:14	---	Recoger a Usuario 26	SANTA LUCIA 4451	N/A
08:30	08:30	09:00	Dejar a Usuario 22	CENTRO CACHON	N/A
08:30	08:39	09:00	Dejar a Usuario 09	CASTRO Y PENA	N/A
09:30	09:30	10:00	Dejar a Usuario 26	MURILLO 2644	N/A
---	09:30	---	Descanso del conductor	Duración: 09:30 - 10:00	---
---	10:07	---	Recoger a Usuario 18	Hospital PASTEUR	N/A
11:30	11:30	12:00	Dejar a Usuario 18	Cno. Maldonado 5745	N/A
11:30	11:50	12:00	Recoger a Usuario 21	OSORIO 1370	N/A
12:00	12:00	12:30	Recoger a Usuario 13	HOSPITAL CLINICAS	N/A
12:00	12:12	12:30	Recoger a Usuario 22	CENTRO CACHON	N/A
---	12:26	---	Dejar a Usuario 22	Cno. Maldonado 5745	N/A
---	12:42	---	Dejar a Usuario 21	MILLAN 3135	N/A
---	12:57	---	Dejar a Usuario 13	LAFONE 2261	N/A
13:00	13:12	13:30	Recoger a Usuario 17	CENATT	N/A
---	13:35	---	Dejar a Usuario 17	FRAGOSO DE RIVERA 1447	N/A
---	13:49	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A

Ruta 2

Vehículo: SBH 9074 (MERCEDES BENZ Sprinter "Microbus" (año 2009))

Chofer: chofer_1 apellido_chofer_1

Hora Inicio: 06:25

Hora Fin: 13:58

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	06:25	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
---	06:44	---	Recoger a Usuario 13	LAFONE 2261	N/A
---	06:58	---	Recoger a Usuario 21	MILLAN 3135	N/A
---	07:11	---	Recoger a Usuario 07	SECCO ILLA 2818	N/A
---	07:16	---	Recoger a Usuario 05	ETNA 5958	N/A
07:30	07:30	08:00	Dejar a Usuario 13	HOSPITAL CLINICAS	N/A
07:30	07:37	08:00	Dejar a Usuario 21	OSORIO 1370	N/A
07:30	07:53	08:00	Dejar a Usuario 05	MEC	N/A
---	07:57	---	Recoger a Usuario 08	25 DE MAYO 177	N/A
---	08:12	---	Recoger a Usuario 10	LUIS BATLLE BERRES 3975	N/A
08:30	08:30	09:00	Dejar a Usuario 07	RINCON 640	N/A
08:30	08:47	09:00	Dejar a Usuario 10	CASTRO Y PENA	N/A
08:30	08:49	09:00	Dejar a Usuario 08	CASTRO Y PENA	N/A
---	09:02	---	Recoger a Usuario 25	Dr. Pedro Castellino 1590	N/A
---	09:12	---	Recoger a Usuario 11	PASAJE DENIS 3444	N/A
09:30	09:30	10:00	Dejar a Usuario 11	MEC	N/A
---	09:45	---	Recoger a Usuario 17	FRAGOSO DE RIVERA 1447	N/A
09:30	09:59	10:00	Dejar a Usuario 25	MURILLO 2644	N/A
---	10:15	---	Recoger a Usuario 23	ESTEBAN GARINO 4035	N/A
10:30	10:39	11:00	Dejar a Usuario 17	CENATT	N/A
11:30	11:30	12:00	Dejar a Usuario 23	ERNESTO HERRERA 802 ESCULA 200	N/A
---	11:30	---	Descanso del conductor	Duración: 11:30 - 12:00	---
12:00	12:04	12:30	Recoger a Usuario 09	CASTRO Y PENA	N/A
---	12:14	---	Dejar a Usuario 09	JOSE CASTRO 4424	N/A
13:00	13:00	13:30	Recoger a Usuario 26	MURILLO 2644	N/A
13:00	13:02	13:30	Recoger a Usuario 25	MURILLO 2644	N/A
---	13:27	---	Dejar a Usuario 26	SANTA LUCIA 4451	N/A
---	13:38	---	Dejar a Usuario 25	Dr. Pedro Castellino 1590	N/A

---	13:58	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
-----	-------	-----	-----	---	-----

Ruta 3

Vehículo: SCQ 4726 (MERCEDES BENZ Sprinter "Microbus" (año 2020))

Chofer: chofer_3 apellido_chofer_tarde_3

Hora Inicio: 13:06

Hora Fin: 20:45

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	13:06	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
13:30	13:30	14:00	Recoger a Usuario 18	Cno. Maldonado 5745	N/A
---	13:40	---	Dejar a Usuario 18	Hospital PASTEUR	N/A
---	13:48	---	Recoger a Usuario 30	LUIS ALBERTO DE HERRERA 1975	N/A
14:00	14:00	14:30	Dejar a Usuario 30	18 DE JULIO Y PABLO DE MARIA (IGLESIA)	N/A
14:00	14:11	14:30	Recoger a Usuario 05	MEC	N/A
---	14:26	---	Dejar a Usuario 05	ETNA 5958	N/A
---	14:43	---	Recoger a Usuario 19	ESCUELA ROOSEVELT	N/A
15:00	15:00	15:30	Recoger a Usuario 08	CASTRO Y PENA	N/A
15:00	15:02	15:30	Recoger a Usuario 10	CASTRO Y PENA	N/A
---	15:07	---	Dejar a Usuario 10	LUIS BATLLE BERRES 3975	N/A
15:00	15:16	15:30	Recoger a Usuario 23	ERNESTO HERRERA 802 ESCULA 200	N/A
---	15:36	---	Dejar a Usuario 23	ESTEBAN GARINO 4035	N/A
15:30	15:56	16:00	Dejar a Usuario 19	BATLLE Y ORDOÑEZ 2462	N/A
---	16:14	---	Dejar a Usuario 08	25 DE MAYO 177	N/A
16:00	16:17	16:30	Recoger a Usuario 11	MEC	N/A
---	16:32	---	Dejar a Usuario 11	PASAJE DENIS 3444	N/A
---	16:41	---	Recoger a Usuario 27	CEIBAL Y PANDO	N/A
16:30	16:50	17:00	Recoger a Usuario 30	18 DE JULIO Y PABLO DE MARIA (IGLESIA)	N/A
17:00	17:02	17:30	Recoger a Usuario 07	RINCON 640	N/A
---	17:17	---	Dejar a Usuario 07	SECCO ILLA 2818	N/A
---	17:23	---	Dejar a Usuario 30	LUIS ALBERTO DE HERRERA 1975	N/A
17:30	17:36	18:00	Dejar a Usuario 27	COOPERATIVA ZUNFELDE	N/A

---	17:47	---	Recoger a Usuario 29	FERRARI	N/A
17:30	17:57	18:00	Dejar a Usuario 29	MICHIGAN 1538	N/A
18:00	18:09	18:30	Recoger a Usuario 20	MAR DEL PLATA	N/A
---	18:45	---	Dejar a Usuario 20	TEOFILO DIAZ 1624	N/A
---	18:57	---	Recoger a Usuario 28	CARLOS DE LA VEGA 5514	N/A
18:50	19:15	19:20	Dejar a Usuario 28	JOAQUIN REQUENA 3010	N/A
---	19:15	---	Descanso del conductor	Duración: 19:15 - 19:45	---
---	20:45	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A

Pedidos No Atendidos

No Atendidos por el Optimizador

ID Pedido	Cliente	Contacto Usuario	Direcciones
204	Usuario 02 (Doc: 82196620)	N/A	- Cno. Maldonado 5745 - HOSPITAL CLINICAS - Cno. Maldonado 5745
205	Usuario 03 (Doc: 85136689)	N/A	- Cno. Maldonado 5745 - HOSPITAL CLINICAS - Cno. Maldonado 5745
206	Usuario 04 (Doc: 69275751)	N/A	- Cno. Maldonado 5745 - HOSPITAL CLINICAS - Cno. Maldonado 5745
208	Usuario 06 (Doc: 52196804)	N/A	- ALBANIA 3680 - RINCON 575 - ALBANIA 3680
215	Usuario 14 (Doc: 75671761)	N/A	- EUSEBIO CABRAL 4250 - MAR DEL PLATA - EUSEBIO CABRAL 4250
225	Usuario 24 (Doc: 8835902)	N/A	- Cam. Guerra & Pje. Tucan - MURILLO 2644 - Cam. Guerra & Pje. Tucan
232	Usuario 31 (Doc: 43789054)	N/A	- MIDES 18 DE JULIO - PJE H 1681 E A SARA VIA Y ALBENIZ

No Enviados al Optimizador

No hay pedidos en esta categoría.

B.2. Planificación Optimizada con Requisitos de Accesibilidad

Este informe corresponde a la optimización del **Caso de Estudio Real** después de haberle incorporado artificialmente requisitos de accesibilidad (sillas de ruedas, rampa eléctrica y acompañantes).

Anexo A.2: Planificación Optimizada con Requisitos de Accesibilidad

Planificación ID: 123 - Fecha: 18/11/2025

Ruta 1

Vehículo: SBH 2740 (PEUGEOT Boxer "Microbus" (año 2014))

Chofer: chofer_1 apellido_chofer_1

Hora Inicio: 06:28

Hora Fin: 13:51

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	06:28	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
---	06:47	---	Recoger a Usuario 13	LAFONE 2261	N/A
---	07:01	---	Recoger a Usuario 21 (Con acompañante)	MILLAN 3135	N/A
---	07:14	---	Recoger a Usuario 07	SECCO ILLA 2818	N/A
---	07:19	---	Recoger a Usuario 05 (Usa silla de ruedas)	ETNA 5958	N/A
07:30	07:30	08:00	Dejar a Usuario 21 (Con acompañante)	OSORIO 1370	N/A
07:30	07:36	08:00	Dejar a Usuario 13	HOSPITAL CLINICAS	N/A
07:30	07:52	08:00	Dejar a Usuario 05 (Usa silla de ruedas)	MEC	N/A
---	08:12	---	Recoger a Usuario 09	JOSE CASTRO 4424	N/A
08:30	08:31	09:00	Dejar a Usuario 07	RINCON 640	N/A
---	08:34	---	Recoger a Usuario 08	25 DE MAYO 177	N/A
08:30	08:52	09:00	Dejar a Usuario 08	CASTRO Y PENA	N/A
08:30	08:54	09:00	Dejar a Usuario 09	CASTRO Y PENA	N/A
---	09:03	---	Recoger a Usuario 26	SANTA LUCIA 4451	N/A
09:30	09:30	10:00	Dejar a Usuario 26	MURILLO 2644	N/A
---	09:33	---	Descanso del conductor	Duración: 09:33 - 10:03	---
11:30	11:30	12:00	Recoger a Usuario 21 (Con acompañante)	OSORIO 1370	N/A
---	11:45	---	Dejar a Usuario 21 (Con acompañante)	MILLAN 3135	N/A
12:00	12:00	12:30	Recoger a Usuario 13	HOSPITAL CLINICAS	N/A
12:00	12:18	12:30	Recoger a Usuario 09	CASTRO Y PENA	N/A
---	12:27	---	Dejar a Usuario 09	JOSE CASTRO 4424	N/A
---	12:37	---	Dejar a Usuario 13	97 LAFONE 2261	N/A

13:00	13:04	13:30	Recoger a Usuario 26	MURILLO 2644	N/A
---	13:30	---	Dejar a Usuario 26	SANTA LUCIA 4451	N/A
---	13:51	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A

Ruta 2

Vehículo: SBH 9074 (MERCEDES BENZ Sprinter "Microbus" (año 2009))

Chofer: chofer_2 apellido_chofer_2

Hora Inicio: 06:34

Hora Fin: 13:42

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	06:34	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
---	06:47	---	Recoger a Usuario 16 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Dufort y Álvarez 3217	N/A
---	07:00	---	Recoger a Usuario 15 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	BUSTAMANTE Y GUERRA 2666	N/A
07:30	07:30	08:00	Dejar a Usuario 15 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	MAR DEL PLATA	N/A
07:30	07:35	08:00	Dejar a Usuario 16 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	MAR DEL PLATA	N/A
---	08:10	---	Recoger a Usuario 02 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Cno. Maldonado 5745	N/A
08:30	08:30	09:00	Dejar a Usuario 02 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	HOSPITAL CLINICAS	N/A
---	09:12	---	Recoger a Usuario 11 (Usa silla de ruedas)	PASAJE DENIS 3444	N/A
09:30	09:30	10:00	Dejar a Usuario 11 (Usa silla de ruedas)	MEC	N/A
---	10:05	---	Recoger a Usuario 17 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	FRAGOSO DE RIVERA 1447	N/A
10:30	10:30	11:00	Dejar a Usuario 17 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	CENATT	N/A
---	10:31	---	Descanso del conductor	Duración: 10:31 - 11:01	---
12:00	12:00	12:30	Recoger a Usuario 02 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	HOSPITAL CLINICAS	N/A
---	12:19	---	Dejar a Usuario 02 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Cno. Maldonado 5745	N/A
13:00	13:00	13:30	Recoger a Usuario 17 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	98 CENATT	N/A

---	13:25	---	Dejar a Usuario 17 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	FRAGOSO DE RIVERA 1447	N/A
---	13:42	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A

Ruta 3

Vehículo: SCQ 4726 (MERCEDES BENZ Sprinter "Microbus" (año 2020))

Chofer: chofer_3 apellido_chofer_tarde_3

Hora Inicio: 13:56

Hora Fin: 20:48

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	13:56	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
14:00	14:00	14:30	Recoger a Usuario 05 (Usa silla de ruedas)	MEC	N/A
---	14:17	---	Dejar a Usuario 05 (Usa silla de ruedas)	ETNA 5958	N/A
---	14:55	---	Recoger a Usuario 19	ESCUELA ROOSEVELT	N/A
15:00	15:00	15:30	Recoger a Usuario 08	CASTRO Y PENA	N/A
---	15:17	---	Dejar a Usuario 08	25 DE MAYO 177	N/A
15:30	15:34	16:00	Dejar a Usuario 19	BATLLE Y ORDOÑEZ 2462	N/A
16:00	16:00	16:30	Recoger a Usuario 11 (Usa silla de ruedas)	MEC	N/A
---	16:17	---	Dejar a Usuario 11 (Usa silla de ruedas)	PASAJE DENIS 3444	N/A
---	16:42	---	Recoger a Usuario 27 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	CEIBAL Y PANDO	N/A
17:00	17:00	17:30	Recoger a Usuario 07	RINCON 640	N/A
---	17:15	---	Dejar a Usuario 07	SECCO ILLA 2818	N/A
17:30	17:30	18:00	Dejar a Usuario 27 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	COOPERATIVA ZUNFELDE	N/A
---	17:44	---	Recoger a Usuario 29	FERRARI	N/A
17:30	17:54	18:00	Dejar a Usuario 29	MICHIGAN 1538	N/A
18:00	18:06	18:30	Recoger a Usuario 20 (Usa silla de ruedas)	MAR DEL PLATA	N/A
---	18:44	---	Dejar a Usuario 20 (Usa silla de ruedas)	TEOFILO DIAZ 1624	N/A
---	19:00	---	Recoger a Usuario 28 (Con acompañante)	99 CARLOS DE LA VEGA 5514	N/A

18:50	19:18	19:20	Dejar a Usuario 28 (Con acompañante)	JOAQUIN REQUENA 3010	N/A
---	19:18	---	Descanso del conductor	Duración: 19:18 - 19:48	---
---	20:48	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A

Pedidos No Atendidos

No Atendidos por el Optimizador

ID Pedido	Ciente	Contacto Usuario	Direcciones
351	Usuario 03 (Doc: 11761597)	N/A	- Cno. Maldonado 5745 - HOSPITAL CLINICAS - Cno. Maldonado 5745
352	Usuario 04 (Doc: 83345412)	N/A	- Cno. Maldonado 5745 - HOSPITAL CLINICAS - Cno. Maldonado 5745
354	Usuario 06 (Doc: 51841611)	N/A	- ALBANIA 3680 - RINCON 575 - ALBANIA 3680
358	Usuario 10 (Doc: 33418796)	N/A	- LUIS BATLLE BERRES 3975 - CASTRO Y PENA - LUIS BATLLE BERRES 3975
361	Usuario 14 (Doc: 721330)	N/A	- EUSEBIO CABRAL 4250 - MAR DEL PLATA - EUSEBIO CABRAL 4250
365	Usuario 18 (Doc: 68253041)	N/A	- Hospital PASTEUR - Cno. Maldonado 5745 - Hospital PASTEUR
369	Usuario 22 (Doc: 49380853)	N/A	- Cno. Maldonado 5745 - CENTRO CACHON - Cno. Maldonado 5745
370	Usuario 23 (Doc: 87381622)	N/A	- ESTEBAN GARINO 4035 - ERNESTO HERRERA 802 ESCULA 200 - ESTEBAN GARINO 4035
371	Usuario 24 (Doc: 25533685)	N/A	- Cam. Guerra & Pje. Tucan - MURILLO 2644 - Cam. Guerra & Pje. Tucan
372	Usuario 25 (Doc: 91145416)	N/A	- Dr. Pedro Castellino 1590 - MURILLO 2644 - Dr. Pedro Castellino 1590
377	Usuario 30 (Doc: 4292916)	N/A	- LUIS ALBERTO DE HERRERA 1975 - 18 DE JULIO Y PABLO DE MARIA (IGLESIA) - LUIS ALBERTO DE HERRERA 1975
378	Usuario 31 (Doc: 41890899)	N/A	- MIDES 18 DE JULIO - PJE H 1681 E A SARAVIA Y ALBENIZ

No Enviados al Optimizador

No hay pedidos en esta categoría.

B.3. Planificación Caso de Estudio de Escalabilidad

Este informe corresponde a la optimización del **Caso de Estudio de Escalabilidad**, donde se amplió artificialmente el caso real para simular un escenario de crecimiento del servicio. En particular, se consideraron 152 solicitudes (escaladas desde las 50 originales), hechas por 100 usuarios (29 originalmente) y una flota de 8 camionetas divididas en dos turnos: 4 operando en la mañana y 4 en la tarde.

Anexo A.3: Planificación Caso de Estudio de Escalabilidad

Planificación ID: 124 - Fecha: 18/11/2025

Ruta 1

Vehículo: SBH 2740 (PEUGEOT Boxer "Microbus" (año 2014))

Chofer: chofer_1 apellido_chofer_1

Hora Inicio: 06:00

Hora Fin: 13:43

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	06:00	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
---	06:10	---	Recoger a Usuario 05 (Con acompañante)	ETNA 5958	N/A
---	06:25	---	Recoger a Usuario 106 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	Via Rita Sabater 33	N/A
---	07:09	---	Recoger a Usuario 09 (Usa silla de ruedas)	JOSE CASTRO 4424	N/A
07:30	07:30	08:00	Dejar a Usuario 05 (Con acompañante)	MEC	N/A
07:30	07:32	08:00	Dejar a Usuario 106 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	MEC	N/A
08:00	08:00	08:30	Recoger a Usuario 108 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	Hospital Pasteur	N/A
---	08:21	---	Recoger a Usuario 10 (Con acompañante)	LUIS BATLLE BERRES 3975	N/A
08:00	08:27	08:30	Recoger a Usuario 081	CENATT	N/A
08:30	08:30	09:00	Dejar a Usuario 10 (Con acompañante)	CASTRO Y PENA	N/A
08:30	08:32	09:00	Dejar a Usuario 09 (Usa silla de ruedas)	CASTRO Y PENA	N/A
---	08:45	---	Dejar a Usuario 108 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	Acceso de Agustina Arévalo 8	N/A
---	08:54	---	Recoger a Usuario 115 (Con acompañante)	Alameda de Saturnina Galan 1	N/A
---	09:04	---	Dejar a Usuario 081	Pasaje de Loreto Dueñas 95	N/A
---	09:23	---	Recoger a Usuario 11 (Con acompañante)	PASAJE DENIS 3444	N/A
09:30	09:37	10:00	Dejar a Usuario 115 (Con acompañante)	Hospital Maciel	N/A
09:30	09:42	10:00	Dejar a Usuario 11 (Con acompañante)	MEC	N/A

---	09:55	---	Recoger a Usuario 119	C. Sandra Doménech 2	N/A
10:30	10:30	11:00	Dejar a Usuario 119	CENATT	N/A
---	10:48	---	Recoger a Usuario 082 (Con acompañante)	Urbanización Herminio Echeverría 65	N/A
11:00	11:22	11:30	Recoger a Usuario 098 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	Hospital Maciel	N/A
11:30	11:30	12:00	Dejar a Usuario 082 (Con acompañante)	Hospital Maciel	N/A
12:00	12:00	12:30	Recoger a Usuario 106 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	MEC	N/A
---	12:16	---	Dejar a Usuario 106 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	Vía Rita Sabater 33	N/A
12:00	12:27	12:30	Recoger a Usuario 09 (Usa silla de ruedas)	CASTRO Y PENA	N/A
---	12:45	---	Dejar a Usuario 098 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	Cañada de Virgilio Ramis 51	N/A
---	12:56	---	Recoger a Usuario 048	Callejón de Javier Serra 665	N/A
---	13:14	---	Dejar a Usuario 09 (Usa silla de ruedas)	JOSE CASTRO 4424	N/A
13:30	13:34	14:00	Dejar a Usuario 048	Hospital Maciel	N/A
---	13:43	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A

Ruta 2

Vehículo: SCQ 4726 (MERCEDES BENZ Sprinter "Microbus" (año 2020))

Chofer: chofer_3 apellido_chofer_tarde_3

Hora Inicio: 06:00

Hora Fin: 13:57

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	06:00	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
---	06:11	---	Recoger a Usuario 041 (Con acompañante)	Calle Gilberto Barreda 87	N/A
---	06:32	---	Recoger a Usuario 065 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Glorieta de Albino Carrión 48	N/A
---	07:07	---	Recoger a Usuario 036	Avenida Fermín Fernández 6	N/A
07:30	07:30	08:00	Dejar a Usuario 041 (Con acompañante)	Facultad de Ingeniería	N/A

07:30	07:32	08:00	Dejar a Usuario 065 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Facultad de Ingeniería	N/A
---	07:47	---	Recoger a Usuario 042 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Acceso de Manuelita Vilalta 9	N/A
08:00	08:00	08:30	Recoger a Usuario 060 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Hospital Maciel	N/A
---	08:11	---	Dejar a Usuario 060 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Urbanización Luisina Sarabia 79	N/A
---	08:24	---	Recoger a Usuario 08 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	25 DE MAYO 177	N/A
08:30	08:30	09:00	Dejar a Usuario 036	Hospital Maciel	N/A
08:30	08:32	09:00	Dejar a Usuario 042 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Hospital Maciel	N/A
08:30	08:52	09:00	Dejar a Usuario 08 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	CASTRO Y PENA	N/A
---	09:01	---	Recoger a Usuario 114 (Con acompañante)	Acceso Felipe Carreño 19	N/A
---	09:12	---	Recoger a Usuario 125 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Acceso de Manuelita Vilalta 9	N/A
09:30	09:30	10:00	Dejar a Usuario 114 (Con acompañante)	CENATT	N/A
09:30	09:32	10:00	Dejar a Usuario 125 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	CENATT	N/A
---	09:46	---	Recoger a Usuario 131 (Con acompañante)	Pasaje Danilo Roldan 2	N/A
09:30	09:56	10:00	Dejar a Usuario 131 (Con acompañante)	Hospital de Clínicas	N/A
---	10:03	---	Recoger a Usuario 17	FRAGOSO DE RIVERA 1447	N/A
10:30	10:30	11:00	Dejar a Usuario 17	CENATT	N/A
---	10:48	---	Recoger a Usuario 18 (Con acompañante)	Hospital PASTEUR	N/A
11:30	11:30	12:00	Dejar a Usuario 18 (Con acompañante)	Cno. Maldonado 5745	N/A
12:00	12:00	12:30	Recoger a Usuario 036	Hospital Maciel	N/A
12:00	12:02	12:30	Recoger a Usuario 042 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Hospital Maciel	N/A
12:00	12:07	12:30	Recoger a Usuario 115 (Con acompañante)	Hospital Maciel	N/A
---	12:15	---	Dejar a Usuario 042 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Acceso de Manuelita Vilalta 9	N/A

12:00	12:29	12:30	Recoger a Usuario 085 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Hospital de Clínicas	N/A
---	12:45	---	Dejar a Usuario 036	Avenida Fermín Fernández 6	N/A
---	12:52	---	Dejar a Usuario 115 (Con acompañante)	Alameda de Saturnina Galan 1	N/A
---	12:54	---	Dejar a Usuario 085 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Alameda de Saturnina Galan 1	N/A
13:00	13:10	13:30	Recoger a Usuario 125 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	CENATT	N/A
---	13:26	---	Dejar a Usuario 125 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Acceso de Manuelita Vilalta 9	N/A
---	13:31	---	Recoger a Usuario 077 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Acceso de Manuelita Vilalta 9	N/A
13:30	13:47	14:00	Dejar a Usuario 077 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Facultad de Ingeniería	N/A
---	13:57	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A

Ruta 3

Vehículo: SCQ 5832 (TOYOTA HiAce "Microbus" (año 2021))

Chofer: chofer_4 apellido_chofer_4

Hora Inicio: 06:00

Hora Fin: 13:55

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	06:00	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
---	06:18	---	Recoger a Usuario 15 (Con acompañante)	BUSTAMANTE Y GUERRA 2666	N/A
---	07:06	---	Recoger a Usuario 099	Callejón de Javier Serra 665	N/A
07:30	07:32	08:00	Dejar a Usuario 15 (Con acompañante)	MAR DEL PLATA	N/A
---	07:54	---	Recoger a Usuario 049 (Con acompañante)	Calle Ciro Fábregas 43	N/A
08:00	08:02	08:30	Recoger a Usuario 122 (Usa silla de ruedas)	Facultad de Ingeniería	N/A
08:00	08:17	08:30	Recoger a Usuario 092	106 Hospital Maciel	N/A

08:30	08:30	09:00	Dejar a Usuario 099	Shopping Tres Cruces	N/A
08:30	08:41	09:00	Dejar a Usuario 049 (Con acompañante)	Hospital Pasteur	N/A
---	09:00	---	Dejar a Usuario 092	Via de Cándido Belda 46	N/A
---	09:09	---	Dejar a Usuario 122 (Usa silla de ruedas)	Pasadizo de Azahar Morcillo 586	N/A
---	09:21	---	Recoger a Usuario 068 (Con acompañante)	Glorieta de Albino Carrión 48	N/A
09:30	09:52	10:00	Dejar a Usuario 068 (Con acompañante)	Hospital Maciel	N/A
---	10:06	---	Recoger a Usuario 051 (Con acompañante)	C. Rufina Zaragoza 11	N/A
11:00	11:00	11:30	Recoger a Usuario 084	Shopping Tres Cruces	N/A
11:00	11:08	11:30	Recoger a Usuario 110	Hospital Pereira Rossell	N/A
11:00	11:14	11:30	Recoger a Usuario 089 (Usa silla de ruedas)	Hospital de Clínicas	N/A
11:00	11:25	11:30	Recoger a Usuario 116	Hospital Pasteur	N/A
11:30	11:30	12:00	Dejar a Usuario 051 (Con acompañante)	Hospital Pasteur	N/A
---	11:44	---	Dejar a Usuario 089 (Usa silla de ruedas)	Cañada de Luciano Quevedo 82	N/A
---	11:49	---	Recoger a Usuario 070 (Con acompañante)	Cañada de Luciano Quevedo 82	N/A
11:30	11:56	12:00	Dejar a Usuario 070 (Con acompañante)	CENATT	N/A
---	12:08	---	Dejar a Usuario 116	Via de Cándido Belda 46	N/A
---	12:17	---	Dejar a Usuario 084	Pasaje de Odalys Vera 63	N/A
---	12:32	---	Dejar a Usuario 110	Cañada de Virgilio Ramis 51	N/A
---	12:38	---	Recoger a Usuario 093 (Con acompañante)	Calle de Marita Quevedo 85	N/A
---	12:44	---	Recoger a Usuario 086 (Con acompañante)	Callejón de Javier Serra 665	N/A
13:00	13:00	13:30	Recoger a Usuario 097 (Usa silla de ruedas)	Hospital Pasteur	N/A
---	13:15	---	Dejar a Usuario 097 (Usa silla de ruedas)	C. Rufina Zaragoza 11	N/A
---	13:20	---	Recoger a Usuario 102 (Usa silla de ruedas)	C. Rufina Zaragoza 11	N/A
13:30	13:31	14:00	Dejar a Usuario 093 (Con acompañante)	Hospital de Clínicas	N/A
13:30	13:33	14:00	Dejar a Usuario 102 (Usa silla de ruedas)	Hospital de Clínicas	N/A
13:30	13:48	14:00	Dejar a Usuario 086 (Con acompañante)	Facultad de Ingeniería	N/A

---	13:55	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
-----	-------	-----	-----	---	-----

Ruta 4

Vehículo: SBH 9074 (MERCEDES BENZ Sprinter "Microbus" (año 2009))

Chofer: chofer_2 apellido_chofer_2

Hora Inicio: 06:00

Hora Fin: 13:50

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	06:00	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
---	06:29	---	Recoger a Usuario 123 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Glorieta de Albino Carrión 48	N/A
---	06:43	---	Recoger a Usuario 047	Calle de Tere Losada 92	N/A
---	07:06	---	Recoger a Usuario 085 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Alameda de Saturnina Galan 1	N/A
---	07:22	---	Recoger a Usuario 055	C. Sandra Doménech 2	N/A
07:30	07:30	08:00	Dejar a Usuario 055	Shopping Tres Cruces	N/A
07:30	07:32	08:00	Dejar a Usuario 047	Shopping Tres Cruces	N/A
07:30	07:43	08:00	Dejar a Usuario 123 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Hospital Pasteur	N/A
---	07:57	---	Recoger a Usuario 03 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Cno. Maldonado 5745	N/A
---	08:04	---	Recoger a Usuario 06 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	ALBANIA 3680	N/A
08:30	08:30	09:00	Dejar a Usuario 085 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Hospital de Clínicas	N/A
08:30	08:35	09:00	Dejar a Usuario 03 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	HOSPITAL CLINICAS	N/A
08:30	08:52	09:00	Dejar a Usuario 06 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	RINCON 575	N/A

---	09:25	---	Recoger a Usuario 072 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Pasaje de Odalys Vera 63	N/A
09:30	09:52	10:00	Dejar a Usuario 072 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Hospital de Clínicas	N/A
10:00	10:00	10:30	Recoger a Usuario 03 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	HOSPITAL CLINICAS	N/A
---	10:19	---	Dejar a Usuario 03 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Cno. Maldonado 5745	N/A
11:00	11:00	11:30	Recoger a Usuario 055	Shopping Tres Cruces	N/A
---	11:05	---	Dejar a Usuario 055	C. Sandra Doménech 2	N/A
11:00	11:16	11:30	Recoger a Usuario 041 (Con acompañante)	Facultad de Ingeniería	N/A
11:00	11:26	11:30	Recoger a Usuario 047	Shopping Tres Cruces	N/A
---	11:37	---	Dejar a Usuario 041 (Con acompañante)	Calle Gilberto Barreda 87	N/A
12:00	12:00	12:30	Recoger a Usuario 037 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Terminal Cerro	N/A
12:00	12:28	12:30	Recoger a Usuario 123 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Hospital Pasteur	N/A
---	12:49	---	Dejar a Usuario 047	Calle de Tere Losada 92	N/A
---	13:00	---	Dejar a Usuario 123 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Glorieta de Albino Carrión 48	N/A
---	13:21	---	Dejar a Usuario 037 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Avenida Fermín Fernández 6	N/A
---	13:26	---	Recoger a Usuario 118 (Con acompañante)	Avenida Fermín Fernández 6	N/A
13:30	13:43	14:00	Dejar a Usuario 118 (Con acompañante)	Facultad de Ingeniería	N/A
---	13:50	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A

Ruta 5

Vehículo: SCQ 6147 (VOLKSWAGEN Crafter "Microbus" (año 2022))

Chofer: chofer_5 apellido_chofer_5

Hora Inicio: 13:00

Hora Fin: 19:04

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	13:00	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
13:00	13:15	13:30	Recoger a Usuario 049 (Con acompañante)	Hospital Pasteur	N/A
13:00	13:25	13:30	Recoger a Usuario 109 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	Hospital Pereira Rossell	N/A
---	13:32	---	Dejar a Usuario 049 (Con acompañante)	Calle Ciro Fábregas 43	N/A
---	13:44	---	Dejar a Usuario 109 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	Plaza Raimundo Angulo 67	N/A
14:00	14:04	14:30	Recoger a Usuario 05 (Con acompañante)	MEC	N/A
14:00	14:06	14:30	Recoger a Usuario 087 (Con acompañante)	MEC	N/A
---	14:20	---	Dejar a Usuario 05 (Con acompañante)	ETNA 5958	N/A
---	14:38	---	Dejar a Usuario 087 (Con acompañante)	C. Santos Reina 65	N/A
---	14:46	---	Recoger a Usuario 19	ESCUELA ROOSEVELT	N/A
15:00	15:00	15:30	Recoger a Usuario 119	CENATT	N/A
---	15:14	---	Dejar a Usuario 119	C. Sandra Doménech 2	N/A
15:30	15:30	16:00	Dejar a Usuario 19	BATLLE Y ORDOÑEZ 2462	N/A
16:00	16:00	16:30	Recoger a Usuario 11 (Con acompañante)	MEC	N/A
---	16:14	---	Dejar a Usuario 11 (Con acompañante)	PASAJE DENIS 3444	N/A
---	16:28	---	Recoger a Usuario 096 (Usa silla de ruedas)	Calle Abilio Bellido 31	N/A
16:30	16:48	17:00	Dejar a Usuario 096 (Usa silla de ruedas)	Hospital Pasteur	N/A
---	17:04	---	Recoger a Usuario 124 (Con acompañante)	Urbanización de Gabriel Valenzuela 33	N/A
17:30	17:30	18:00	Dejar a Usuario 124 (Con acompañante)	Terminal Cerro	N/A
---	17:45	---	Recoger a Usuario 28 (Con acompañante)	CARLOS DE LA VEGA 5514	N/A
18:00	18:00	18:30	Recoger a Usuario 067	Hospital Saint Bois	N/A
18:00	18:02	18:30	Recoger a Usuario 039	Hospital Saint Bois	N/A
18:00	18:10	18:30	Recoger a Usuario 054 (Con acompañante)	CENATT	N/A
---	18:21	---	Dejar a Usuario 054 (Con acompañante)	Calle de Sabina Mas 69	N/A
---	18:24	---	Dejar a Usuario 067	Plaza Raimundo Angulo 67	N/A

---	18:30	---	Dejar a Usuario 039	Pasaje Danilo Roldan 2	N/A
18:50	18:50	19:20	Dejar a Usuario 28 (Con acompañante)	JOAQUIN REQUENA 3010	N/A
---	19:04	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A

Ruta 6

Vehículo: SCQ 8374 (RENAULT Master "Microbus" (año 2022))

Chofer: chofer_7 apellido_chofer_7

Hora Inicio: 13:00

Hora Fin: 18:29

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	13:00	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
---	13:26	---	Recoger a Usuario 066	Pasadizo de Azahar Morcillo 586	N/A
13:30	13:54	14:00	Dejar a Usuario 066	Terminal Cerro	N/A
14:00	14:12	14:30	Recoger a Usuario 114 (Con acompañante)	CENATT	N/A
---	14:19	---	Dejar a Usuario 114 (Con acompañante)	Acceso Felipe Carreño 19	N/A
---	14:30	---	Recoger a Usuario 052 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	Rambla Bonifacio Pera 8	N/A
14:30	14:41	15:00	Dejar a Usuario 052 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	Hospital Pereira Rossell	N/A
15:00	15:00	15:30	Recoger a Usuario 06 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	RINCON 575	N/A
---	15:29	---	Dejar a Usuario 06 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	ALBANIA 3680	N/A
16:00	16:00	16:30	Recoger a Usuario 118 (Con acompañante)	Facultad de Ingeniería	N/A
16:00	16:11	16:30	Recoger a Usuario 093 (Con acompañante)	Hospital de Clínicas	N/A
---	16:23	---	Dejar a Usuario 118 (Con acompañante)	Avenida Fermín Fernández 6	N/A
---	16:32	---	Dejar a Usuario 093 (Con acompañante)	Calle de Marita Quevedo 85	N/A
17:00	17:00	17:30	Recoger a Usuario 077 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Facultad de Ingeniería	N/A

---	17:15	---	Dejar a Usuario 077 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Acceso de Manuelita Vilalta 9	N/A
18:00	18:00	18:30	Recoger a Usuario 111 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	MEC	N/A
---	18:15	---	Dejar a Usuario 111 (Usa silla de ruedas, Con acompañante)	Ronda Rafaela Salcedo 880	N/A
---	18:29	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A

Ruta 7

Vehículo: SCQ 9485 (IVECO Daily "Microbus" (año 2023))

Chofer: chofer_8 apellido_chofer_8

Hora Inicio: 13:00

Hora Fin: 19:04

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	13:00	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
13:00	13:03	13:30	Recoger a Usuario 101	MEC	N/A
13:00	13:21	13:30	Recoger a Usuario 17	CENATT	N/A
---	13:32	---	Dejar a Usuario 101	Pasadizo de Custodio Mir 131	N/A
---	13:45	---	Recoger a Usuario 30 (Usa silla de ruedas)	LUIS ALBERTO DE HERRERA 1975	N/A
---	13:53	---	Dejar a Usuario 17	FRAGOSO DE RIVERA 1447	N/A
14:00	14:03	14:30	Dejar a Usuario 30 (Usa silla de ruedas)	18 DE JULIO Y PABLO DE MARIA (IGLESIA)	N/A
14:00	14:19	14:30	Recoger a Usuario 088 (Con acompañante)	Hospital Pasteur	N/A
---	14:35	---	Dejar a Usuario 088 (Con acompañante)	Via Rita Sabater 33	N/A
---	14:38	---	Recoger a Usuario 074 (Con acompañante)	Calle Gilberto Barreda 87	N/A
15:00	15:00	15:30	Recoger a Usuario 127	MEC	N/A
---	15:17	---	Dejar a Usuario 127	Callejón de Segismundo Tello 24	N/A
15:30	15:30	16:00	Dejar a Usuario 074 (Con acompañante)	CENATT	N/A
---	15:44	---	Recoger a Usuario 046 (Con acompañante)	Cuesta de Calixto Vilaplana 65	N/A
---	15:58	---	Recoger a Usuario 071 (Con acompañante)	112 Acceso de Agustina Arévalo 8	N/A

16:30	16:30	17:00	Dejar a Usuario 071 (Con acompañante)	Hospital Pereira Rossell	N/A
16:30	16:32	17:00	Dejar a Usuario 046 (Con acompañante)	Hospital Pereira Rossell	N/A
16:30	16:36	17:00	Recoger a Usuario 30 (Usa silla de ruedas)	18 DE JULIO Y PABLO DE MARIA (IGLESIA)	N/A
---	16:48	---	Dejar a Usuario 30 (Usa silla de ruedas)	LUIS ALBERTO DE HERRERA 1975	N/A
17:00	17:09	17:30	Recoger a Usuario 061	MEC	N/A
---	17:32	---	Dejar a Usuario 061	Calle de Marita Quevedo 85	N/A
18:00	18:01	18:30	Recoger a Usuario 20 (Con acompañante)	MAR DEL PLATA	N/A
---	18:36	---	Dejar a Usuario 20 (Con acompañante)	TEOFILO DIAZ 1624	N/A
---	19:04	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A

Ruta 8

Vehículo: SCQ 7259 (FIAT Ducato "Microbus" (año 2021))

Chofer: chofer_6 apellido_chofer_6

Hora Inicio: 13:00

Hora Fin: 18:39

Hmin.	Hora	HMax.	Acción	Dirección / Lugar	Contacto Usuario
---	13:00	---	Comienzo	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A
13:00	13:07	13:30	Recoger a Usuario 099	Shopping Tres Cruces	N/A
---	13:21	---	Dejar a Usuario 099	Callejón de Javier Serra 665	N/A
13:30	13:35	14:00	Recoger a Usuario 18 (Con acompañante)	Cno. Maldonado 5745	N/A
---	13:45	---	Dejar a Usuario 18 (Con acompañante)	Hospital PASTEUR	N/A
14:00	14:00	14:30	Recoger a Usuario 051 (Con acompañante)	Hospital Pasteur	N/A
---	14:12	---	Dejar a Usuario 051 (Con acompañante)	C. Rufina Zaragoza 11	N/A
---	14:21	---	Recoger a Usuario 034 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Plaza Raimundo Angulo 67	N/A

14:30	14:40	15:00	Dejar a Usuario 034 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	Hospital Saint Bois	N/A
15:00	15:00	15:30	Recoger a Usuario 10 (Con acompañante)	CASTRO Y PENA	N/A
15:00	15:02	15:30	Recoger a Usuario 08 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	CASTRO Y PENA	N/A
---	15:10	---	Dejar a Usuario 10 (Con acompañante)	LUIS BATLLE BERRES 3975	N/A
---	15:26	---	Dejar a Usuario 08 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica, Con acompañante)	25 DE MAYO 177	N/A
---	15:37	---	Recoger a Usuario 31 (Con acompañante)	MIDES 18 DE JULIO	N/A
16:00	16:00	16:30	Recoger a Usuario 082 (Con acompañante)	Hospital Maciel	N/A
16:30	16:30	17:00	Dejar a Usuario 31 (Con acompañante)	PJE H 1681 E A SARA VIA Y ALBENIZ	N/A
---	16:48	---	Dejar a Usuario 082 (Con acompañante)	Urbanización Herminio Echeverría 65	N/A
---	17:06	---	Recoger a Usuario 121 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Ronda de Feliciano Alba 87	N/A
17:30	17:30	18:00	Dejar a Usuario 121 (Usa silla de ruedas, Precisa rampa eléctrica)	Facultad de Ingeniería	N/A
18:00	18:00	18:30	Recoger a Usuario 048	Hospital Maciel	N/A
---	18:19	---	Dejar a Usuario 048	Callejón de Javier Serra 665	N/A
---	18:39	---	Fin	Deposito Camionetas (Domingo Petrarca, Palermo, Montevideo, 11114, Uruguay)	N/A

Pedidos No Atendidos

No Atendidos por el Optimizador

ID Pedido	Ciente	Contacto Usuario	Direcciones
766	Usuario 02 (Doc: 43305434)	N/A	- Cno. Maldonado 5745 - HOSPITAL CLINICAS - Cno. Maldonado 5745
768	Usuario 04 (Doc: 26456861)	N/A	- Cno. Maldonado 5745 - HOSPITAL CLINICAS - Cno. Maldonado 5745
776	Usuario 13 (Doc: 50548184)	N/A	- LAFONE 2261 - HOSPITAL CLINICAS - LAFONE 2261
784	Usuario 032 (Doc: 99839644)	N/A	- Calle de Dulce Llobet 26 - Hospital Saint Bois - Calle de Dulce Llobet 26
785	Usuario 033 (Doc: 15098918)	N/A	- Urbanización Herminio Echeverría 65 - MEC
796	Usuario 044 (Doc: 39762359)	N/A	- Pasaje de Loreto Dueñas 95 - Hospital Maciel
797	Usuario 045 (Doc: 42250512)	N/A	- Paseo de Felipa Mate 95 - CENATT
802	Usuario 050 (Doc: 38056501)	N/A	- Glorieta de Albino Carrión 48 - Hospital Pereira Rossell
814	Usuario 062 (Doc: 26179754)	N/A	- Ronda de Lalo Saavedra 45 - Hospital Saint Bois - Ronda de Lalo Saavedra 45
815	Usuario 063 (Doc: 37513298)	N/A	- Acceso Felipe Carreño 19 - Hospital de Clínicas - Acceso Felipe Carreño 19
816	Usuario 064 (Doc: 28875588)	N/A	- Callejón de Javier Serra 665 - Terminal Cerro - Callejón de Javier Serra 665
821	Usuario 069 (Doc: 92954775)	N/A	- Cuesta de Calixto Vilaplana 65 - Hospital Pereira Rossell - Cuesta de Calixto Vilaplana 65
830	Usuario 078 (Doc: 58441362)	N/A	- Cuesta María Manuela Sarmiento 14 - Facultad de Ingeniería - Cuesta María Manuela Sarmiento 14
831	Usuario 079 (Doc: 11522917)	N/A	- Rambla Bonifacio Pera 8 - Hospital Saint Bois - Rambla Bonifacio Pera 8
832	Usuario 080 (Doc: 323797)	N/A	- Plaza de Luis Diez 5 - Hospital Saint Bois - Plaza de Luis Diez 5

842	Usuario 090 (Doc: 92605602)	N/A	- Alameda de Saturnina Galan 1 - Hospital Saint Bois
843	Usuario 091 (Doc: 88123704)	N/A	- Callejón de Segismundo Tello 24 - Shopping Tres Cruces - Callejón de Segismundo Tello 24
847	Usuario 095 (Doc: 87279899)	N/A	- Calle Ciro Fábregas 43 - Terminal Cerro - Calle Ciro Fábregas 43
855	Usuario 103 (Doc: 32800157)	N/A	- Pasaje de Loreto Dueñas 95 - Facultad de Ingeniería - Pasaje de Loreto Dueñas 95
859	Usuario 107 (Doc: 96302998)	N/A	- C. Casandra Buendía 45 - Hospital de Clínicas - C. Casandra Buendía 45
878	Usuario 126 (Doc: 76876881)	N/A	- Calle Ciro Fábregas 43 - Terminal Cerro
881	Usuario 129 (Doc: 15395414)	N/A	- Urbanización Herminio Echeverría 65 - Hospital Saint Bois - Urbanización Herminio Echeverría 65
882	Usuario 130 (Doc: 61047344)	N/A	- Calle Ciro Fábregas 43 - Hospital Saint Bois - Calle Ciro Fábregas 43
884	Usuario 21 (Doc: 88981089)	N/A	- MILLAN 3135 - OSORIO 1370 - MILLAN 3135
887	Usuario 24 (Doc: 84629345)	N/A	- Cam. Guerra & Pje. Tucan - MURILLO 2644 - Cam. Guerra & Pje. Tucan
888	Usuario 25 (Doc: 1163912)	N/A	- Dr. Pedro Castellino 1590 - MURILLO 2644 - Dr. Pedro Castellino 1590
889	Usuario 26 (Doc: 17795146)	N/A	- SANTA LUCIA 4451 - MURILLO 2644 - SANTA LUCIA 4451

No Enviados al Optimizador

No hay pedidos en esta categoría.