



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial (Acceso desde Grado I. de Organización Industrial)

AUTOR/A: González Gutiérrez, Nuria

Tutor/a: Andrés Navarro, Beatriz

Cotutor/a: Torre Martínez, María Rocío de la

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero aprovechar la ocasión para dar las gracias a mi familia, sin el cariño y apoyo recibido no hubiera sido posible llegar tan lejos. A mi pareja, José, que ha sufrido conmigo los momentos más difíciles como estudiante. También a mis compañeros de máster, he tenido la suerte de coincidir con gente siempre dispuesta a ayudar a los demás y esto lo ha hecho más fácil. Por último, Beatriz y Rocío, mis tutoras, siempre dispuestas a ayudarme, sin vosotras no hubiera sido posible conseguir este resultado.

## **RESUMEN**

Los conceptos relacionados con la entrega de última milla eficiente son clave para hacer frente a la creciente expansión del comercio electrónico, tratando de reducir el tráfico en las ciudades y minimizar su impacto ambiental.

El presente TFM propone una solución para optimizar la entrega de última milla en Valencia mediante el uso de sistemas no tripulados integrados con el transporte público. El enfoque incluye el diseño y la asignación de rutas de entrega para la última milla. Para ello se (i) analiza el área urbana, su población y sus líneas de transporte público; (ii) identifica de forma óptima los nodos clave para la localización de depósitos de recepción, almacenamiento y entrega; y (iii) selecciona el número de vehículos adecuado. De esta forma, se diseña una red de entrega que integre los vehículos no tripulados con la red de transporte público; y finalmente se lleva a cabo la asignación dinámica de rutas para adaptarse a las condiciones cambiantes.

El trabajo tiene como objetivo mejorar la eficiencia y la sostenibilidad del proceso de entrega de última milla, aprovechando la infraestructura existente y reduciendo la congestión del tráfico.

**Palabras Clave:** Logística; Transporte; Última milla; Ciudades inteligentes; Diseño de redes; Asignación de rutas; Vehículos aéreos no tripulados

## RESUM

Els conceptes relacionats amb el lliurament d'última milla eficient són clau per a fer front a la creixent expansió del comerç electrònic, tractant de reduir el trànsit a les ciutats i minimitzar el seu impacte ambiental.

El present TFM proposa una solució per a optimitzar el lliurament d'última milla a València mitjançant l'ús de sistemes no tripulats integrats amb el transport públic. L'enfocament inclou el disseny i l'assignació de rutes de lliurament per a l'última milla. Per a això es (i) analitza l'àrea urbana, la seua població i les seues línies de transport públic; (ii) identifica de manera òptima els nodes clau per a la localització de depòsits de recepció, emmagatzematge i lliurament; i (iii) selecciona el nombre de vehicles adequats. D'aquesta manera, es dissenya una xarxa de lliurament que integre els vehicles no tripulats amb la xarxa de transport públic; i finalment es duu a terme l'assignació dinàmica de rutes per a adaptar-se a les condicions canviants.

El treball té com a objectiu millorar l'eficiència i la sostenibilitat del procés de lliurament d'última milla, aprofitant la infraestructura existent i reduint la congestió del trànsit.

**Paraules clau:** Logística; Transport; Última milla; Ciutats intel·ligents; Disseny de xarxes; Assignació de rutes; Vehicles aeris no tripulats.



## **ABSTRACT**

Concepts related to efficient last mile delivery are key to cope with the growing expansion of e-commerce, trying to reduce traffic in cities and minimise its environmental impact.

This TFM proposes a solution to optimise last mile delivery in Valencia by using unmanned systems integrated with public transport. The approach includes the design and assignment of delivery routes for the last mile. This is done by (i) analysing the urban area, its population and its public transport lines; (ii) optimally identifying key nodes for the location of receiving, storage and delivery depots; and (iii) selecting the appropriate number of vehicles. In this way, a delivery network is designed that integrates the unmanned vehicles with the public transport network; and finally, dynamic routing is carried out to adapt to changing conditions.

The work aims to improve the efficiency and sustainability of the last mile delivery process by leveraging existing infrastructure and reducing traffic congestion.

**Keywords:** Logistics; Transport; Last mile; Smart cities; Network design; Routing; Unmanned aerial vehicles.

# ÍNDICE

## ÍNDICE DE LA MEMORIA

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. OBJETIVOS DEL DOCUMENTO .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. METODOLOGÍA .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO: LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILLA .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILLA .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. DESAFÍOS DE LA ENTREGA DE ÚLTIMA MILLA .....</b>	<b>6</b>
2.2.1. FACTORES QUE AFECTAN A LA EFICIENCIA .....	6
2.2.2. IMPACTO AMBIENTAL .....	7
2.2.3. IMPACTO SOCIOECONÓMICO .....	7
2.2.4. ASPECTOS REGULATORIOS Y NORMATIVOS .....	8
<b>2.3. TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA LA ENTREGA DE ÚLTIMA MILLA .....</b>	<b>9</b>
2.3.1. VEHÍCULOS AUTÓNOMOS .....	9
2.3.2. DRONES DE ENTREGA .....	10
2.3.3. HUBS LOGÍSTICOS URBANOS .....	10
<b>CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE TRANSPORTE URBANO INTELIGENTE EN VALENCIA.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ENTREGA DE ÚLTIMA MILLA EN VALENCIA .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>14</b>
<b>3.3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>CAPÍTULO 4. DISEÑO DE RUTAS DE ENTREGA PARA LA ÚLTIMA MILLA EN VALENCIA</b>	<b>17</b>
<b>4.1. ANÁLISIS DEL ÁREA URBANA.....</b>	<b>17</b>
4.1.1. UBICACIÓN DEL ALMACÉN CENTRAL .....	18
.....	22
4.1.2. ANÁLISIS DE LAS LÍNEAS URBANAS DE AUTOBÚS .....	23
4.1.3. ANÁLISIS DE NODOS CLAVE .....	26
<b>4.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS .....</b>	<b>48</b>
4.2.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS LOCKERS PRINCIPALES Y SECUNDARIOS .....	48
4.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS DRONES .....	58
<b>4.3. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ENTREGA.....</b>	<b>62</b>
4.3.1. PROBLEMA DE CARGA .....	62

<b>CAPÍTULO 5. IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD .....</b>	<b>67</b>
<b>5.1. EMISIONES DE CO<sub>2</sub> Y CONTAMINANTES .....</b>	<b>67</b>
<b>5.2. REDUCCIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO .....</b>	<b>68</b>
5.2.1. EMISIONES TOTALES ANUALES .....	68
<b>CAPÍTULO 6. ESTUDIO ECONÓMICO .....</b>	<b>69</b>
<b>6.1. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN.....</b>	<b>69</b>
<b>6.2. ANÁLISIS FINANCIERO .....</b>	<b>69</b>
6.2.1. INGRESOS ANUALES.....	69
6.2.2. COSTOS OPERATIVOS ANUALES.....	70
6.2.3. FLUJO DE CAJA NETO ANUAL.....	70
6.2.4. PERÍODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (PRI) .....	70
6.2.5. VALOR ACTUAL NETO (VAN) .....	70
6.2.6. TASA INTERNA DE RETORNO (TIR) .....	71
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>73</b>
<b>7.1. CONCLUSIONES.....</b>	<b>73</b>
<b>7.2. LIMITACIONES DEL ESTUDIO .....</b>	<b>74</b>
<b>7.3. FUTURO DE LA ENTREGA DE ÚLTIMA MILLA INTELIGENTE .....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>77</b>
<b>8.1. PLANO VALENCIA.....</b>	<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>79</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología seguida en el desarrollo del proyecto Fuente: Elaboración Propia .....	3
Figura 2. Diagrama de flujo a seguir para seleccionar los nodos clave Fuente: Elaboración Propia .....	17
Figura 3. Distrito de Quatre Carreres en Valencia Fuente: Google Maps.....	19
Figura 4. Barrios del Distrito de Quatre Carreres en Valencia Fuente: Ajuntament de València	20
Figura 5. Ubicación del <i>depot</i> principal Fuente: Google Maps .....	22
Figura 6. Construcción abandonada Fuente: Google Maps.....	22
Figura 7. Líneas de autobús de Valencia Fuente: Moovit .....	23
Figura 8. Recorrido de la línea de autobús 13 Fuente: Moovit.....	24
Figura 9. Recorrido de la línea de autobús 6 Fuente: Moovit.....	24
Figura 10. Paradas de la línea de autobús 13 (azul) y línea de autobús 6 (naranja) y distancias entre ellas en kilómetros Fuente: Elaboración Propia.....	27
Figura 11. Esquema de los algoritmos a utilizar y la relación que existe entre ellos Fuente: Elaboración Propia.....	31
Figura 12. Paradas seleccionadas que cubren a todas las demás Fuente: Google Maps; Elaboración Propia.....	47
Figura 13. Enfoque 1: Entrega de paquetes utilizando drones integrados con el transporte público Fuente: Elaboración Propia.....	48
Figura 14. Enfoque 2: Entrega de paquetes utilizando drones integrados con el transporte público Fuente: Elaboración Propia.....	54
Figura 15. Dimensiones <i>locker</i> secundario Fuente: Elaboración Propia .....	57
Figura 16. Dimensiones <i>locker</i> principal Fuente: Elaboración Propia.....	57
Figura 17. Dron de reparto DJI FlyCart 30 Fuente: DJI.....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distancias en kilómetros entre las dos líneas de autobús Fuente: Elaboración Propia	29
Tabla 2. Aplicación del algoritmo de Church y Revelle en la línea de autobús 13 Fuente: Elaboración Propia.....	30
Tabla 3. Aplicación del algoritmo de Church y Revelle en la línea de autobús 6 Fuente: Elaboración Propia.....	38
Tabla 4. Aplicación del algoritmo de Church y Revelle en las línea de autobús 13 y 6 Fuente: Elaboración Propia.....	42
Tabla 5. Barrios, área y habitantes correspondientes a la Parada 2 Fuente: Elaboración Propia .....	49
Tabla 6. Barrios, área y habitantes correspondientes a la Parada 5 Fuente: Elaboración Propia .....	49
Tabla 7. Barrios, área y habitantes correspondientes a la Parada 10 Fuente: Elaboración Propia .....	50
Tabla 8. Barrios, área y habitantes correspondientes a la Parada 14 Fuente: Elaboración Propia .....	50
Tabla 9. Barrios, área y habitantes correspondientes a la Parada 24 Fuente: Elaboración Propia .....	50
Tabla 10. Barrios, área y habitantes correspondientes a la Parada 27 Fuente: Elaboración Propia .....	51
Tabla 11. Coeficientes de proporcionalidad de las distintas paradas Fuente: Elaboración Propia .....	51
Tabla 12. Pedidos demandados al día en cada parada Fuente: Elaboración Propia.....	52
Tabla 13. Drones necesarios en cada parada Fuente: Elaboración Propia .....	52
Tabla 14. Tiempo que el autobús debe permanecer estacionado en cada parada mientras que el dron descarga los paquetes.....	63

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Localización de los barrios y el Centro de Gravedad del distrito de Cuatro Carreres Fuente: Elaboración Propia .....	21
---	----

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo de las tecnologías digitales ha transformado los hábitos de los consumidores, dando como resultado un escenario que representa un reto para la distribución de mercancía a nivel urbano. La entrega de última milla se ha convertido en un elemento crucial en la logística en los últimos años, especialmente con el auge del comercio electrónico. Las ciudades enfrentan desafíos significativos debido al incremento del tráfico, la congestión urbana y el impacto ambiental asociado a las entregas a domicilio. Además, la creciente demanda de pedidos en línea ha aumentado la expectativa de los usuarios por una entrega rápida y cómoda. Estos problemas requieren soluciones innovadoras que integren nuevas tecnologías y enfoques sostenibles (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023).

Este estudio se enmarca en la necesidad de desarrollar soluciones logísticas que no solo aborden los problemas actuales de congestión y emisiones, sino que también sean sostenibles y adaptables a las necesidades futuras de las ciudades inteligentes. La logística de última milla representa uno de los componentes más complejos y costosos de la cadena de suministro, y la adopción de tecnologías autónomas puede ser una vía efectiva para optimizar estos procesos (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Schnieder, Hinde, & West, 2022).

Las nuevas tecnologías, como los vehículos autónomos y los drones, ofrecen soluciones innovadoras para enfrentar estos desafíos. Los sistemas de entrega autónomos han captado la atención de las empresas de logística por su potencial para minimizar errores y tiempo de entrega, además de reducir el impacto ambiental y permitir entregas 24/7 (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Schnieder, Hinde, & West, 2022).

Sin embargo, los desafíos asociados con la capacidad de carga limitada y la autonomía de la batería de los vehículos aéreos no tripulados impulsado investigaciones sobre el uso de vehículos públicos y soluciones híbridas para la entrega de paquetes, ampliando de esta forma el alcance de los drones. Además, algunos estudios han demostrado que la integración de estas novedosas tecnologías mejora significativamente la eficiencia de la entrega de última milla (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Deng, y otros, 2023).

El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) propone una solución para optimizar la entrega de última milla en Valencia mediante el uso de sistemas no tripulados integrados con el transporte público. De esta forma, se consigue un sistema más eficiente disminuyendo los costos operativos, reduciendo la congestión, minimizando el impacto ambiental e incrementando la comodidad del cliente (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Schnieder, Hinde, & West, 2022) (Deng, y otros, 2023) (Lemardele, y otros, 2023).

### 1.1. OBJETIVOS DEL DOCUMENTO

El **objetivo principal** de este TFM consiste en reducir la congestión y el impacto ambiental en el proceso de distribución de productos en la última milla aplicado a la ciudad de Valencia.

Para conseguir el objetivo principal, se definen los siguientes **objetivos específicos (OE)**:

**OE1:** Estudiar las tecnologías emergentes de la entrega de última milla y los desafíos a los que se enfrenta.

**OE2:** Analizar el área urbana de la ciudad de Valencia, evaluando la distribución geográfica de la población y las líneas de transporte público que operan en la ciudad.

**OE3:** Diseñar y asignar rutas de entrega de última milla empleando sistemas no tripulados integrados con el transporte público.

**OE4:** Determinar las características de los *lockers* primarios, secundarios y drones de entrega.

**OE5:** Evaluar la solución propuesta analizando el impacto que esta supone.

Este proyecto está alineado con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Principalmente, contribuye al ODS 11: “Ciudades y comunidades sostenibles”, al mejorar la eficiencia del transporte urbano y reducir la congestión del tráfico y la contaminación del aire mediante el uso de drones y el aprovechamiento del transporte público. También se relaciona con el ODS 8: “Trabajo decente y crecimiento económico”, al fomentar la creación de empleos en el sector tecnológico y logístico. Además, apoya el ODS 9: “Industria, innovación e infraestructura”, promoviendo el uso de tecnologías avanzadas en la logística de última milla. Asimismo, el proyecto tiene implicaciones positivas para el ODS 12: “Producción y consumo responsables”, al optimizar los recursos utilizados en la cadena de suministro y el tráfico en las ciudades, y para el ODS 13: “Acción por el clima”, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de soluciones más sostenibles y eficientes (Naciones Unidas, 2015).

El TFM integra y aplica los conocimientos adquiridos en las asignaturas cursadas en el Máster Universitario en Ingeniería Industrial, conectando de manera significativa con diversas asignaturas. La asignatura de Dirección de Proyectos ha sido de gran ayuda para la planificación y gestión del proyecto, asegurando una ejecución eficiente y efectiva. Gracias a las asignaturas Diseño y Aplicación de Equipos Industriales, Tecnología Informática Industrial, Tecnología Electrónica, Tecnología Automática e Instrumentación y Control Industrial, se han adquirido las bases técnicas para el diseño y selección de equipos y para el desarrollo e implementación de los sistemas de automatización y control correspondientes. Para garantizar la eficiencia energética y sostenibilidad del proyecto se han empleado los conocimientos aprendidos en las asignaturas de Tecnología Energética, Máquinas Eléctricas y Generación, Transporte y Distribución de Energía Eléctrica. Por último, Dirección de Empresas y Dirección de Operaciones han sido clave para evaluar la viabilidad económica y operacional del proyecto, asegurando su alineación con los objetivos de desarrollo sostenible.

## 1.2. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados, se seguirá la siguiente metodología, representada en la Figura 1:

1. Para comenzar, se presentan las motivaciones relativas al tema de investigación, los objetivos principal y específicos, y la metodología seguida.
2. Se realizará una revisión bibliográfica y análisis del estado del arte sobre logística de última milla, desafíos a los que se enfrenta y tecnologías emergentes del transporte urbano inteligente (OE1).
3. A continuación, se estudia el caso concreto aplicado a la ciudad de Valencia y se define el problema (OE2).
4. Se diseñan las rutas de entrega para la última milla, analizando el área urbana en la ciudad de Valencia para identificar los puntos estratégicos para la ubicación de los *lockers*. También se determinan las características técnicas de los *lockers* y de los drones empleados y se optimiza el sistema de entrega (OE3 y OE4).
5. Se realiza la evaluación del impacto. Para ello, se evalúa el impacto ambiental de la solución propuesta y los costos de implementación y beneficio económico (OE5).
6. Finalmente, se analizan los resultados de la solución propuesta y se identifican tanto las limitaciones del estudio como el futuro de la entrega de última milla inteligente (OE5).

Este enfoque permitirá desarrollar una solución para la optimización de la entrega de última milla en Valencia, integrando tecnologías avanzadas y aprovechando la infraestructura de transporte público existente.

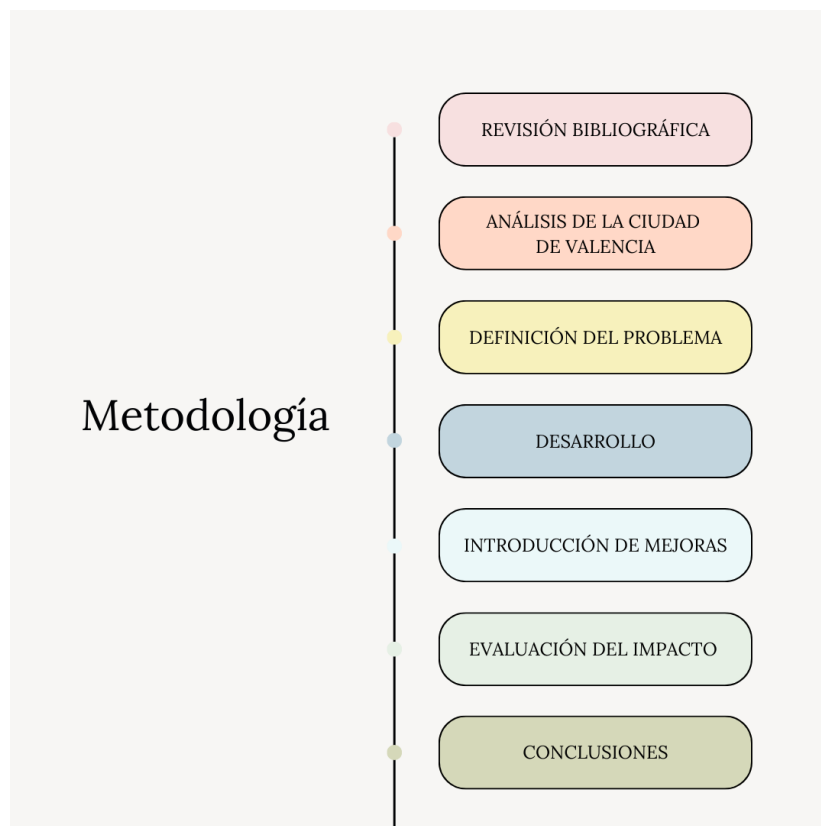


Figura 1. Metodología seguida en el desarrollo del proyecto

Fuente: Elaboración Propia





# **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO: LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILLA**

El Capítulo 2 se enfoca en proporcionar un marco teórico sobre la logística de última milla, abordando su evolución, importancia y los desafíos que enfrenta en la actualidad. También se exploran las principales tecnologías emergentes, como los vehículos autónomos y los drones.

## **2.1. LOGÍSTICA DE ÚLTIMA MILLA**

El concepto de logística de última milla ha evolucionado considerablemente a lo largo de los años. Inicialmente, se centraba en la entrega a tiendas minoristas y grandes almacenes. Con el auge del comercio electrónico, la logística de última milla ha cambiado para enfocarse más en la entrega directa a los consumidores finales.

De esta forma, la logística de última milla se define como el tramo final del proceso de entrega de productos desde un centro de distribución hasta el cliente final. Esta etapa es crucial, ya que representa una de las partes más costosas y complejas de la cadena de suministro. La demanda de entregas rápidas y eficientes ha incrementado significativamente, lo que plantea varios desafíos y oportunidades para las empresas logísticas.

La entrega de última milla implica una serie de actividades que incluyen la recolección, clasificación, transporte y entrega de paquetes. Estas actividades deben ser gestionadas de manera eficiente para satisfacer las expectativas de los clientes y mantener la competitividad en el mercado. La industria 4.0 se refiere a la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT), la robótica y la analítica de datos; lo que ha transformado la forma en que las empresas operan, permitiendo una mayor automatización, eficiencia y flexibilidad en la cadena de suministro. En la logística de última milla, la Industria 4.0 juega un papel muy importante al facilitar la implementación de tecnologías como drones, vehículos autónomos y sistemas inteligentes de gestión de transporte. La eficiencia en la entrega de última milla puede ser afectada por varios factores, incluyendo la congestión del tráfico, el impacto ambiental, las restricciones urbanas y las limitaciones tecnológicas y operativas (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Chen, Xie, Chen, Chu, & Lin, 2022) (European Commission, 2023).

En la actualidad, ya existen empresas utilizando sistemas de entrega inteligentes como drones. Por ejemplo, Google, a través de su proyecto *Wing*, y Amazon, con *Prime Air*, han implementado la entrega con drones en varios países. *Wing* ha realizado entregas en Australia, Finlandia y Estados Unidos, mientras que Amazon ha probado sus sistemas de entrega con drones en el Reino Unido y Estados Unidos. Estos sistemas permiten realizar entregas rápidas y eficientes, especialmente en áreas de difícil acceso y alta congestión (Lázaro, 2024) (Logistics&Automation, 2024).

## 2.2. DESAFÍOS DE LA ENTREGA DE ÚLTIMA MILLA

### 2.2.1. FACTORES QUE AFECTAN A LA EFICIENCIA

La entrega de última milla enfrenta una serie de desafíos significativos que afectan su eficiencia, siendo uno de los más críticos la congestión del tráfico. No es común que la infraestructura de las ciudades esté preparada para manejar el creciente volumen de vehículos de entrega generado por el aumento del comercio electrónico. Esta congestión no solo retrasa las entregas, sino que también incrementa los costos operativos, la contaminación ambiental y colapsa las ciudades (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023) (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023).

El elevado tráfico urbano puede ser causado por varios factores, incluyendo la elevada densidad de población, la falta de planificación urbana adecuada y las infraestructuras de transporte limitadas. Esto provoca tiempos de espera prolongados para los vehículos de entrega, lo cual reduce significativamente la eficiencia operativa. Además, las restricciones de acceso en ciertas áreas urbanas durante horas pico agravan aún más estos problemas (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023).

Para abordar estos desafíos, las empresas logísticas están adoptando tecnologías avanzadas de planificación de rutas y gestión del tráfico. Estos sistemas utilizan datos en tiempo real, algoritmos de optimización y modelos predictivos para identificar las rutas más eficientes y evitar zonas de congestión. Por ejemplo, el uso de sistemas de gestión de transporte integrados con tecnologías de Internet de las Cosas permite monitorear y ajustar las rutas en tiempo real, mejorando así la eficiencia de las entregas (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023).

Sin embargo, la implementación de estas soluciones también presenta ciertos desafíos relacionados con el intercambio de datos en tiempo real. Además, se requiere una colaboración estrecha entre las autoridades municipales y las empresas de logística para desarrollar políticas y regulaciones que faciliten la implementación de estas tecnologías (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023) (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Mohammad Imran, Mishra, & Won, 2023) (Alverhed, y otros, 2024).

### **2.2.2. IMPACTO AMBIENTAL**

El impacto ambiental de la logística de última milla es una preocupación creciente debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes generados por los vehículos de entrega tradicionales. Dichos vehículos, a menudo impulsados por combustibles fósiles, contribuyen significativamente a la contaminación del aire y al cambio climático. Especialmente, en áreas urbanas densamente pobladas, las emisiones de estos vehículos pueden tener efectos perjudiciales sobre la salud pública y el medio ambiente (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023) (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018).

Para mitigar estos efectos, muchas empresas logísticas están adoptando vehículos eléctricos y tecnologías más sostenibles. Los vehículos eléctricos, aunque enfrentan limitaciones en cuanto a autonomía y capacidad de carga, ofrecen una alternativa más ecológica en cuanto a las emisiones que producen. Además, estos vehículos pueden reducir significativamente la contaminación acústica en las zonas urbanas, lo cual es un beneficio adicional en entornos donde el ruido es una preocupación (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023).

Además de los vehículos eléctricos, las empresas están explorando otras soluciones innovadoras como el uso de bicicletas de carga eléctricas, sistemas de entrega colaborativa, vehículos autónomos y drones de entrega. Estas alternativas no solo reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también pueden aliviar la congestión del tráfico al disminuir el número de vehículos de gran tamaño en las calles de las ciudades.

Las políticas gubernamentales y las regulaciones ambientales juegan un papel crucial en la promoción de prácticas logísticas sostenibles. La implementación de zonas de bajas emisiones, la promoción de infraestructuras de recarga de vehículos eléctricos y la implementación de tecnologías verdes son algunas de las medidas que están siendo adoptadas por las autoridades municipales para reducir el impacto ambiental de la logística de última milla (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023) (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Alverhed, y otros, 2024).

### **2.2.3. IMPACTO SOCIOECONÓMICO**

La logística de última milla no solo afecta a la eficiencia operativa de las empresas, sino que también tiene un impacto significativo en la economía y la sociedad. Este impacto puede observarse en diversas áreas, incluyendo el empleo, el comercio y la percepción pública.

Los efectos que se pueden dar en el empleo, la automatización y la digitalización pueden reducir la necesidad de mano de obra en algunos sectores tradicionales de la logística, como el transporte y la manipulación de paquetes. Sin embargo, también crean nuevas oportunidades de empleo en áreas como la tecnología, la gestión de datos y el mantenimiento de sistemas automatizados. Por ejemplo, el desarrollo y la gestión de flotas de vehículos autónomos y drones requieren personal especializado en ingeniería, programación y análisis de datos. Además la implementación de estas tecnologías puede generar demanda para roles de ciberseguridad, dado que es necesaria la protección de los sistemas autónomos (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023).

El impacto en el comercio se puede ver reflejado en el aumento en la competitividad de las empresas minoristas, permitiéndoles ofrecer mejores servicios a los clientes reduciendo costos. Con entregas más rápidas y precisas, las empresas pueden mejorar la satisfacción del cliente y fidelizar a más consumidores. Además, la capacidad de realizar entregas eficientes puede expandir el alcance de las tiendas minoristas, permitiéndoles competir en un mercado más amplio.

En cuanto al uso de nuevas tecnologías en la entrega de paquetes puede generar inseguridades entre los consumidores relacionadas con la privacidad, la seguridad, el vandalismo y robo, y la confiabilidad. Para lo que será necesario implementar medidas de seguridad robustas y realizar campañas de sensibilización para concienciar al público sobre las ventajas y la seguridad de estas tecnologías (Alverhed, y otros, 2024).

#### 2.2.4. ASPECTOS REGULATORIOS Y NORMATIVOS

La implementación de tecnologías emergentes en la logística de última milla está sujeta a diversas regulaciones y normativas. Es crucial que las empresas cumplan con las leyes locales e internacionales para operar de manera legal y segura.

A continuación, se describen algunos de los principales aspectos regulatorios y normativos que deben considerarse al adoptar nuevas tecnologías en la logística de última milla. Las regulaciones generales abarcan una amplia gama de temas, desde la seguridad operativa hasta la protección de datos y la sostenibilidad ambiental. Estas regulaciones son esenciales para asegurar que las nuevas tecnologías se implementen de manera responsable y segura:

- **Seguridad operativa:** Las leyes deben asegurar que los vehículos autónomos y drones operen de manera segura, evitando accidentes y garantizando la protección de los peatones y otros usuarios de la vía. Esto incluye investigaciones para sistemas de prevención de colisiones, planes de acción en caso de fallos técnicos y protocolos de emergencia.
- **Protección de datos:** Con el uso de drones y vehículos autónomos equipados con cámaras y sensores, la privacidad de los ciudadanos se convierte en una preocupación a tener en cuenta. Las empresas deben cumplir con regulaciones como el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) en Europa, que establece directrices claras sobre la recolección, almacenamiento y uso de datos personales.
- **Sostenibilidad ambiental:** Las regulaciones también pueden incluir requisitos para minimizar el impacto ambiental de las nuevas tecnologías, como el uso de los vehículos eléctricos y la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

En concreto, el uso de drones para la entrega de paquetes presenta desafíos regulatorios específicos. En muchos países, los drones deben estar registrados y los operadores deben obtener licencias específicas para volar drones comerciales. También existen restricciones sobre dónde pueden volar los drones; generalmente, está prohibido volar drones comerciales cerca de aeropuertos, bases militares y en áreas densamente pobladas sin permisos especiales. Las regulaciones suelen establecer límites sobre la altitud máxima a la que pueden volar los drones y requieren que permanezcan dentro de la línea de visión del operador, a menos que se utilicen tecnologías avanzadas de control y monitoreo.

En cuanto a los vehículos autónomos, deben pasar rigurosas pruebas de seguridad antes de ser certificados para uso comercial; estas pruebas evalúan la capacidad del vehículo para operar de manera segura en diversas condiciones de tráfico y clima. También se debe tener en cuenta que las leyes deben aclarar quién es el responsable en caso de un accidente que involucre un vehículo autónomo, esto incluye la necesidad de seguros específicos para cubrir posibles daños. Además, los vehículos autónomos a menudo dependen de la infraestructura de comunicación de la ciudad; por lo que, las regulaciones pueden requerir que las ciudades actualicen su infraestructura para soportar la operación segura de estos vehículos.

En la Unión Europea, la agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) regula el uso de drones, mientras que las regulaciones sobre vehículos autónomos están en desarrollo y varían según los estados miembros (European Union Aviation Safety (EASA), 2024).

De esta forma, para cumplir con las regulaciones y normativas, las empresas deben trabajar en estrecha colaboración con las autoridades locales y nacionales (Lu, 2023) (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018) (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Schnieder, Hinde, & West, 2022) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023) (Alverhed, y otros, 2024).

### **2.3. TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA LA ENTREGA DE ÚLTIMA MILLA**

Existen diversos modelos de logística de última milla, cada uno con sus propias ventajas y desafíos.

Por un lado, los modelos tradicionales de logística de última milla incluyen la entrega directa desde centros de distribución a consumidores y la utilización de almacenes locales o tiendas físicas como puntos de recogida.

Por otro lado, los modelos emergentes incluyen el uso de vehículos autónomos, drones y hubs logísticos urbanos. Estos modelos se centran en la optimización de las rutas y la reducción del impacto ambiental mediante el uso de tecnologías avanzadas.

#### **2.3.1. VEHÍCULOS AUTÓNOMOS**

Los vehículos autónomos están revolucionando la logística de última milla al ofrecer una solución eficiente y segura para la entrega de paquetes. Dichos vehículos están equipados con sensores avanzados, sistemas de navegación GPS y algoritmos de inteligencia artificial; siendo capaces de operar sin intervención humana, lo que reduce significativamente los costos y mejora la eficiencia operativa (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023).

Uno de los principales beneficios de los vehículos autónomos es su capacidad para operar las veinticuatro horas del día, lo que permite entregas continuas y mejora la flexibilidad del servicio. Además, estos vehículos pueden comunicarse entre sí y con las infraestructuras urbanas a través de tecnologías IoT, lo que optimiza la gestión del tráfico y reduce la congestión. Por ejemplo, las flotas de vehículos autónomos pueden ajustar sus rutas en tiempo real para evitar áreas congestionadas y minimizar los tiempos de entrega (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023).

La seguridad es otro aspecto a tener en cuenta de los vehículos autónomos. En cuanto a los accidentes de tráfico, la mayoría son causados debido al error humano; por lo que, de esta forma, se podrían reducir significativamente. Además, los vehículos autónomos, están equipados con sistemas avanzados de prevención de colisiones y pueden responder de manera más rápida y precisa a las condiciones cambiantes del tráfico. Sin embargo, la implementación de esta tecnología requiere una infraestructura adecuada y un marco regulatorio que aún está en desarrollo en muchos lugares (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023) (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Lemardele, y otros, 2023) (Mohammad Imran, Mishra, & Won, 2023) (Engesser, Rombaut, Vanhaverbeke, & Lebeau, 2023) (Alverhed, y otros, 2024).

### **2.3.2. DRONES DE ENTREGA**

Los drones de entrega representan otra tecnología emergente que promete transformar la logística de última milla. Estos dispositivos no tripulados pueden transportar pequeños paquetes directamente al domicilio del cliente, evitando el tráfico y accediendo a áreas que los vehículos terrestres no pueden alcanzar. Los drones son especialmente útiles en entornos urbanos densos, donde pueden realizar entregas rápidas y eficientes.

El uso de drones tiene varios beneficios ambientales, ya que funcionan con electricidad y no emiten gases contaminantes durante su operación. Además, pueden reducir la necesidad de vehículos de entrega tradicionales, disminuyendo así la congestión del tráfico y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, los drones enfrentan desafíos regulatorios y tecnológicos, como la gestión del espacio aéreo urbano y la limitación en la capacidad de carga. La integración de drones en el sistema logístico también requiere la implementación de hubs logísticos y sistemas de gestión avanzada para coordinar las entregas (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023) (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018) (Lemardele, y otros, 2023) (Mohammad Imran, Mishra, & Won, 2023) (Chen, Xie, Chen, Chu, & Lin, 2022).

### **2.3.3. HUBS LOGÍSTICOS URBANOS**

Los *hubs* logísticos urbanos son instalaciones estratégicamente ubicadas dentro de las ciudades para facilitar la consolidación y distribución de paquetes. Estos *hubs* permiten una mayor eficiencia en la entrega de última milla al reducir la distancia que los vehículos deben recorrer para entregar los paquetes finales. Además, pueden servir como puntos de recarga de vehículos eléctricos y drones, optimizando el uso de las tecnologías sostenibles (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023) (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018).

La implementación de *hubs* logísticos puede integrar tecnologías avanzadas como sistemas automatizados de clasificación y almacenamiento, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo los tiempos de procesamiento. Estos *hubs* también pueden funcionar como centros de *micro-fulfillment*, permitiendo a los minoristas almacenar productos cerca de los consumidores y reducir los tiempos de entrega (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023).

Es necesaria la colaboración entre las autoridades municipales y las empresas logísticas para la implementación de estos *hubs*. También es preciso realizar estudios para detectar ubicaciones estratégicas para facilitar las operaciones logísticas. Asimismo, la incorporación de tecnologías de última generación en los *hubs* logísticos urbanos permiten el manejo de grandes volúmenes de paquetes de manera eficiente (Rubrichi, Grazia Gnoni, & Tornese, 2023) (Li, Diaz, Morantes, & Dorati, 2018) (Tadic, Veljovic, Krstic, & Zecevic, 2023) (Alverhed, y otros, 2024).





# **CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE TRANSPORTE URBANO**

## **INTELIGENTE EN VALENCIA**

En el Capítulo 3 se aborda la situación de la entrega de última milla en Valencia, analizando su contexto actual, los problemas más relevantes y proponiendo una solución.

### **3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ENTREGA DE ÚLTIMA MILLA EN VALENCIA**

Valencia, una ciudad conocida por su enfoque innovador y su compromiso con el desarrollo sostenible, ha estado trabajando en mejorar su sistema de transporte urbano, y la entrega de última milla es un componente clave en este proceso.

La entrega de última milla en Valencia se caracteriza por:

- 1. Uso de tecnologías tradicionales:** La mayoría de las entregas se realizan mediante vehículos de combustión interna, que contribuyen significativamente a la congestión del tráfico y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, las rutas de entrega se planifican utilizando sistemas de gestión de transporte que no siempre optimizan las rutas en tiempo real.
- 2. Infraestructura:** Valencia ha comenzado a implementar puntos de recogida estratégicos como *lockers*, aunque la ciudad todavía no está completamente optimizada para la entrega de última milla (Levante: El Mercantil Valenciano, 2024).
- 3. Sostenibilidad:** Existe un creciente interés en la adopción de vehículos eléctricos para las entregas, pero su uso aún no está ampliamente extendido. Como en el resto de áreas, se están tomando medidas para reducir el impacto ambiental que esto supone. Además, Valencia ha sido reconocida por la Comisión Europea como Capital Verde Europea durante 2024, gracias a las políticas verdes que se han implementado en la ciudad (Ajuntament de València, 2024).

El transporte público en Valencia se caracteriza por:

- 4.** Poseer una extensa red de transporte público que conecta todos los barrios y zonas turísticas de interés. En concreto, consta de 60 líneas de autobús, 5 de metro, 4 de tranvía, 180 rutas de autobuses metropolitanos y 6 trenes de cercanías (Visitvalencia, 2024).

### 3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La entrega de última milla en Valencia enfrenta varios desafíos significativos que impiden la optimización del proceso logístico y afectan negativamente tanto a la eficiencia operativa como al impacto ambiental:

- 1. Congestión del tráfico:** Como se menciona previamente, el aumento del comercio electrónico ha incrementado significativamente el volumen de entregas diarias, lo que agrava la congestión del tráfico urbano. Las infraestructuras viales no están preparadas para manejar el alto volumen de vehículos de entrega, lo que da lugar a atascos y retrasos.
- 2. Autonomía de las baterías:** La duración de las baterías de los drones de entrega es otro problema a tener en cuenta; ya que, limita el tiempo de operación y puede ser insuficiente para tareas largas o complejas.
- 3. Eficiencia y costos operativos:** La planificación de rutas de entrega es un proceso complejo que está afectado por diferentes factores, como las restricciones de acceso en ciertas áreas y las variaciones en la demanda diaria. Además, se requiere una elevada inversión inicial con el fin de implementar tecnologías avanzadas y la infraestructura necesaria.
- 4. Impacto ambiental:** El uso de vehículos de combustión interna genera emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes, afectando a la calidad del aire y contribuyendo al cambio climático. Se observa que la falta de una red extensa de vehículos eléctricos y otros medios sostenibles incrementa el consumo de combustibles fósiles.
- 5. Regulaciones y normativas:** La implementación de nuevas tecnologías está sujeta a regulaciones que aún están en desarrollo. Se precisa de una estrecha colaboración con las autoridades locales y nacionales para desarrollar políticas que faciliten la implementación de tecnologías emergentes.
- 6. Expectativas del consumidor:** Los consumidores esperan entregas rápidas y confiables, además de políticas de devolución gratuitas, lo que incrementa la presión sobre los sistemas de entrega de última milla. De esta forma, para mantener un alto nivel de satisfacción del cliente se requiere un equilibrio entre la eficiencia operativa y la calidad del servicio.

### 3.3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Con el fin de lograr el objetivo principal de reducir la congestión y el impacto ambiental y mejorar la eficiencia del proceso, abordando los desafíos mencionados previamente, se propone diseñar un modelo de distribución de última milla que coordina los servicios de transporte público y las rutas de entrega, aprovechando la extensa red de transporte público que ofrece la ciudad. Esta solución incluiría el empleo de drones para realizar entregas rápidas y eficientes, especialmente en áreas de difícil acceso y alta congestión.

Con la solución propuesta se abordan los desafíos actuales de diversas maneras:

1. La **congestión del tráfico** disminuirá al integrar el transporte público junto con los drones en la entrega de última milla, disminuyendo el número de vehículos en las calles de la ciudad (OE1 y OE2).
2. Al aprovechar las distancias recorridas por el transporte público, las distancias a recorrer por los drones serán menores, por lo que, de esta forma, se resuelve el problema relativo a la **autonomía de la batería** de los mismos (OE1 y OE2).
3. La **eficiencia operativa** mejorará con la optimización de las rutas de entrega y la expansión de la red de *lockers* para facilitar la distribución de paquetes. Los **costos operativos** se amortizarán al mejorar la eficiencia y reducir los costos asociados a la congestión y emisiones (OE3 y OE4).
4. En el **impacto ambiental** también se observará una gran mejoría con la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> (OE5).
5. Será necesario gestionar las **regulaciones y normativas** colaborando con las autoridades locales para facilitar la implementación de las nuevas tecnologías (OE5).
6. De esta forma, las **expectativas del consumidor** serán satisfechas mediante entregas más rápidas y fiables (OE5).



# CAPÍTULO 4. DISEÑO DE RUTAS DE ENTREGA PARA LA ÚLTIMA MILLA EN VALENCIA

El Capítulo 4 del presente TFM aborda el diseño de rutas de entrega para la última milla en Valencia. Se analiza el área urbana seleccionando un almacén central, se examinan las líneas de autobús urbanas y se identifican los nodos clave para optimizar las rutas de entrega. Además, se determinan las características técnicas de los *lockers* primarios y secundarios, sí como de los drones, con el objetivo de crear un sistema de entrega eficiente que integre vehículos no tripulados con el transporte público.

## 4.1. ANÁLISIS DEL ÁREA URBANA

Para diseñar las rutas de entrega de la última milla en Valencia, es necesario analizar el área urbana. Para ello, se seguirá el diagrama de flujo representado en la Figura 2. Se comienza ubicando el almacén central, donde se almacenan los pedidos que posteriormente se entregan a los clientes. A continuación, se analizan las líneas de autobús. Por último, se seleccionan los nodos clave, con el objetivo de plantear las rutas de entrega óptimas para el caso planteado.

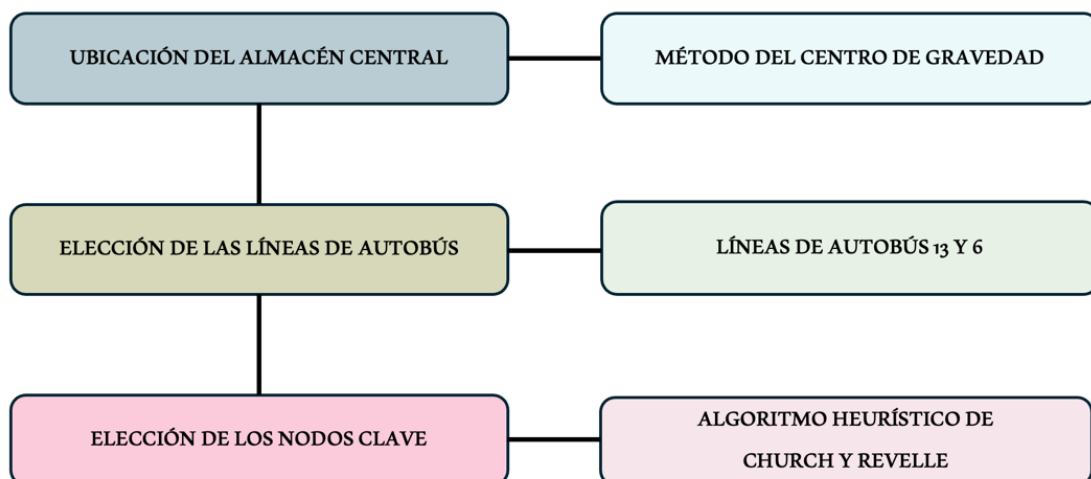


Figura 2. Diagrama de flujo a seguir para seleccionar los nodos clave

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.1. UBICACIÓN DEL ALMACÉN CENTRAL

Para comenzar, es necesario ubicar el almacén central (*depot* principal) que servirá de almacenamiento de paquetes para posteriormente realizar la entrega correspondiente. Para ello, aunque existen diversos métodos de localización, se utiliza el Método del Centro de Gravedad, esta técnica es útil para la ubicación del *depot* principal; ya que, se busca un equilibrio óptimo entre varios puntos de demanda (Sabater, 2014) (Gisbert, 2019).

La ciudad de Valencia se divide en diecinueve distritos, divididos a su vez en los ochenta y siete barrios y pedanías, los cuales se muestran a continuación:

1. **Ciutat Vella:** La Seu - La Xerea - El Carmen - El Pilar - El Mercat - Sant Francesc
2. **Eixample:** Russafa - El Pla Del Remei - Gran Via
3. **Extramurs:** Botànic - La Roqueta - La Petxina - Arrancapins
4. **Campanar:** Campanar - Les Tendetes - El Calvari - Sant Pau
5. **La Saïdia:** Marxalenes - Morvedre - Trinitat - Tormos - Sant Antoni
6. **El Pla del Real:** Exposició - Mestalla - Jaume Roig - Ciutat Universitària
7. **L'Olivereta:** Nou Moles - Soternes - Tres Forques - La Font Santa - La Llum
8. **Patraix:** Patraix - Sant Isidre - Vara de Quart - Safranar - Favara
9. **Jesús:** La Raiosa - L'Hort de Senabre - La Creu Coberta - Sant Marcel·lí - Camí Real
10. **Quatre Carreres:** Montolivet - En Corts - Malilla - La Fonteta de Sant Lluís - Na Rovella - La Punta - Ciutat de les Arts i les Ciències
11. **Poblats Marítims:** El Grau - El Cabanyal-El Canyameler - La Malva-Rosa - Beteró - Natzaret
12. **Camins al Grau:** Aiora - Albors - La Creu del Grau - Camí Fondo - Penya-Roja
13. **Algirós:** L'Illa Perduda - Ciutat Jardí - L'Amistat - La Bega Baixa - La Carrasca
14. **Benimaclet:** Benimaclet- Camí de Vera
15. **Rascanya:** Orriols - Torrefiel - Sant Llorenç
16. **Benicalap:** Benicalap - Ciutat Fallera
17. **Poblats del Nord:** Benifaraig - Pueblo Nuevo - Carpesa - Casas de Barcena - Mahuella - Masarrochos - Borbotó - Rafalell y Vistabella
18. **Poblats de l'Oest:** Benimàmet - Beniferri
19. **Poblats del Sud:** Horno de Alcedo - Castellar-L'Oliveral - Pinedo - El Saler - El Palmar - El Perellonet - La Torre - Faitanar-La Punta

Se decide analizar el distrito de Quatre Carreres, resaltado en la Figura 3, ya que es el más poblado y más transitado de Valencia. Este distrito se caracteriza por su elevada densidad de población y su significativa actividad económica y comercial. Con barrios clave como Montolivet, En Corts, Malilla, La Fonteta de Sant Lluís, Na Rovella, La Punta, y la Ciutat de les Arts i les Ciències, Quatre Carreres presenta una mezcla diversa de zonas residenciales, comerciales y culturales que requieren una eficiente planificación logística para la entrega de última milla. Además, la variedad de infraestructuras y la accesibilidad de transporte público en Quatre Carreres ofrecen un contexto ideal para implementar soluciones innovadoras de logística de última milla (Ajuntament de València, 2023) (Valenciaplaza, 2022).

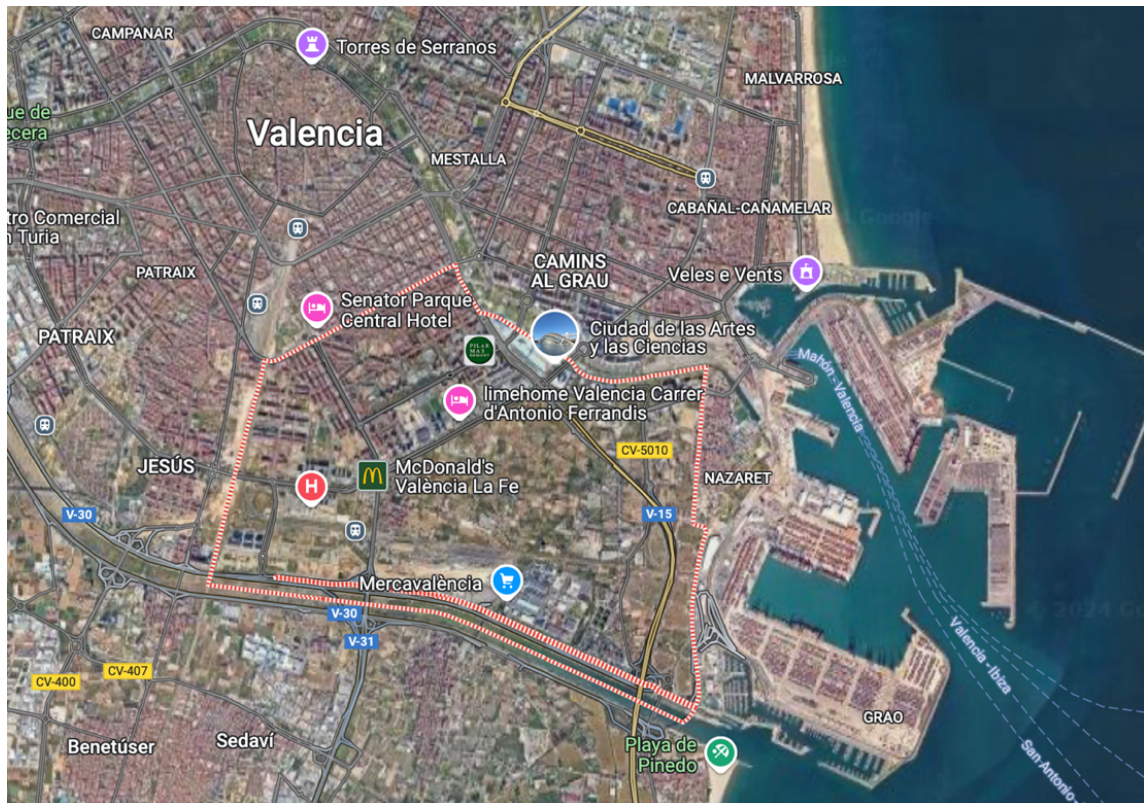


Figura 3. Distrito de Cuatro Carreres en Valencia  
Fuente: Google Maps

### MÉTODO DEL CENTRO DE GRAVEDAD

El Método del Centro de Gravedad es una técnica de optimización que se utiliza para determinar la ubicación del *depot* principal. El objetivo consiste en minimizar la distancia total ponderada que deben recorrer los vehículos desde el almacén hasta los distintos puntos de entrega en las áreas designadas. Esta técnica considera tanto las coordenadas geográficas de los puntos de entrega como la demanda de productos en cada uno de esos puntos (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009).



Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

Para aplicar el Método del Centro de Gravedad, son necesarias las coordenadas de los distintos barrios del distrito de Quatre Carreres, representados en la Figura 4:

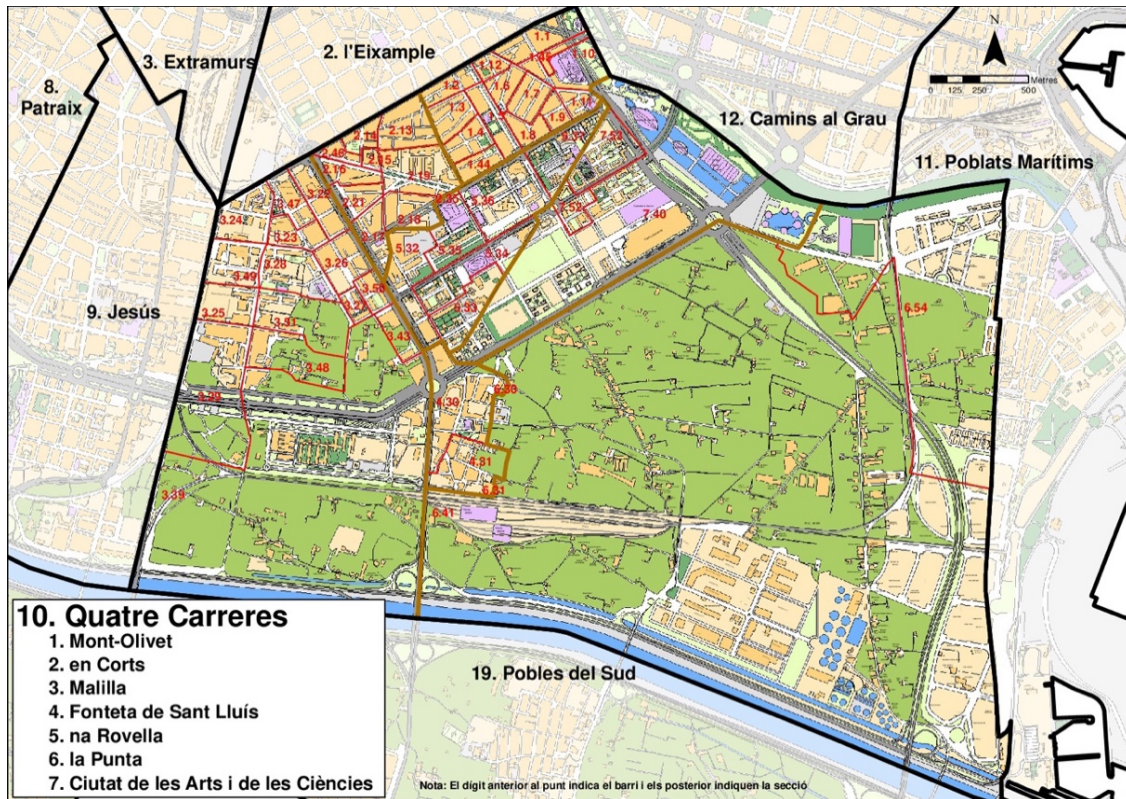


Figura 4. Barrios del Distrito de Quatre Carreres en Valencia  
Fuente: Ajuntament de València

- Montolivet (39,460391, -0,364775)
- En Corts (39,456273, -0,371230)
- Malilla (39,446319, -0,377167)
- La Fonteta de Sant Lluís (39,444164, -0,67461)
- Na Rovella (39,453231, -0,365979)
- La punta (39,443019, -0,352324)
- Ciutat de les Arts i les Ciències (39,455354, -0,355969) (Google Maps, 2024)

A continuación, se estiman las cantidades de productos transportados a cada barrio, utilizando la población de cada barrio y suponiendo una demanda promedio de un producto por habitante. De esta forma, se consigue establecer la proporción necesaria de demanda de productos para calcular el Centro de Gravedad.

- Montolivet: 19.204 productos (19.204 habitantes)
- En Corts: 12.028 productos (12.028 habitantes)
- Malilla: 22.287 productos (22.287 habitantes)
- La Fonteta de Sant Lluís: 3.040 productos (3.040 habitantes)
- Na Rovella: 5.905 productos (5.905 habitantes)
- La punta: 2.769 productos (2.769 habitantes)
- Ciutat de les Arts i les Ciències: 7.687 productos (7.687 habitantes) (Ajuntament de València, 2023)

Una vez localizados los distintos barrios y conociendo las demandas, se calculan las coordenadas del centro de gravedad empleando las ecuaciones [1] y [2]:

$$C_x = \frac{\sum_i d_{ix} Q_i}{\sum_i Q_i} = 39,45 \quad [1]$$

$$C_y = \frac{\sum_i d_{iy} Q_i}{\sum_i Q_i} = -0,37 \quad [2]$$

Donde:

$C_x$  y  $C_y$  = Coordenadas del centro de gravedad.

$d_{ix}$  y  $d_{iy}$  = Coordenadas x e y del barrio i.

$Q_i$  = Demanda de productos en el barrio i.

En el Gráfico 1 se muestra la localización de los barrios del distrito de Quatre Carreres y el Centro de Gravedad calculado:

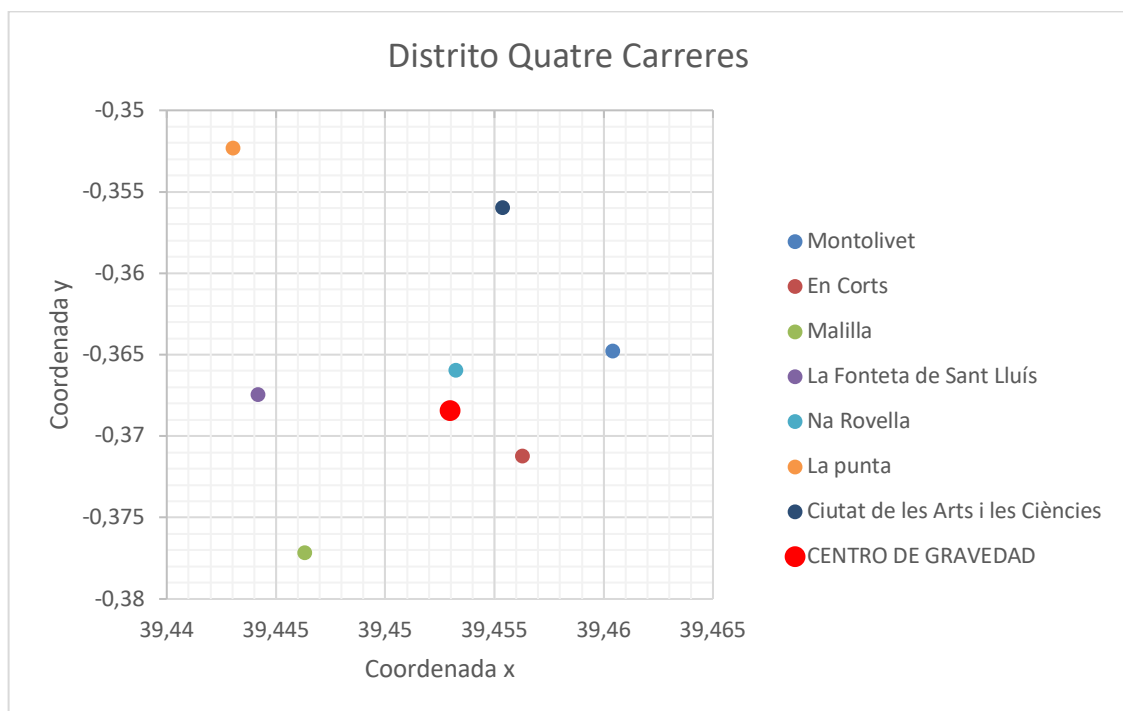


Gráfico 1. Localización de los barrios y el Centro de Gravedad del distrito de Quatre Carreres  
Fuente: Elaboración Propia

Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

Por lo tanto, la localización ideal que minimiza la distancia ponderada entre el almacén central y los distintos barrios corresponde con las coordenadas (39,45, -0,37). Dicho punto coincide con la Calle Sollana, 2631, Quatres Carrere 46013 Valencia, que además corresponde con una construcción abandonada, como se puede observar en las Figuras 5 y 6:

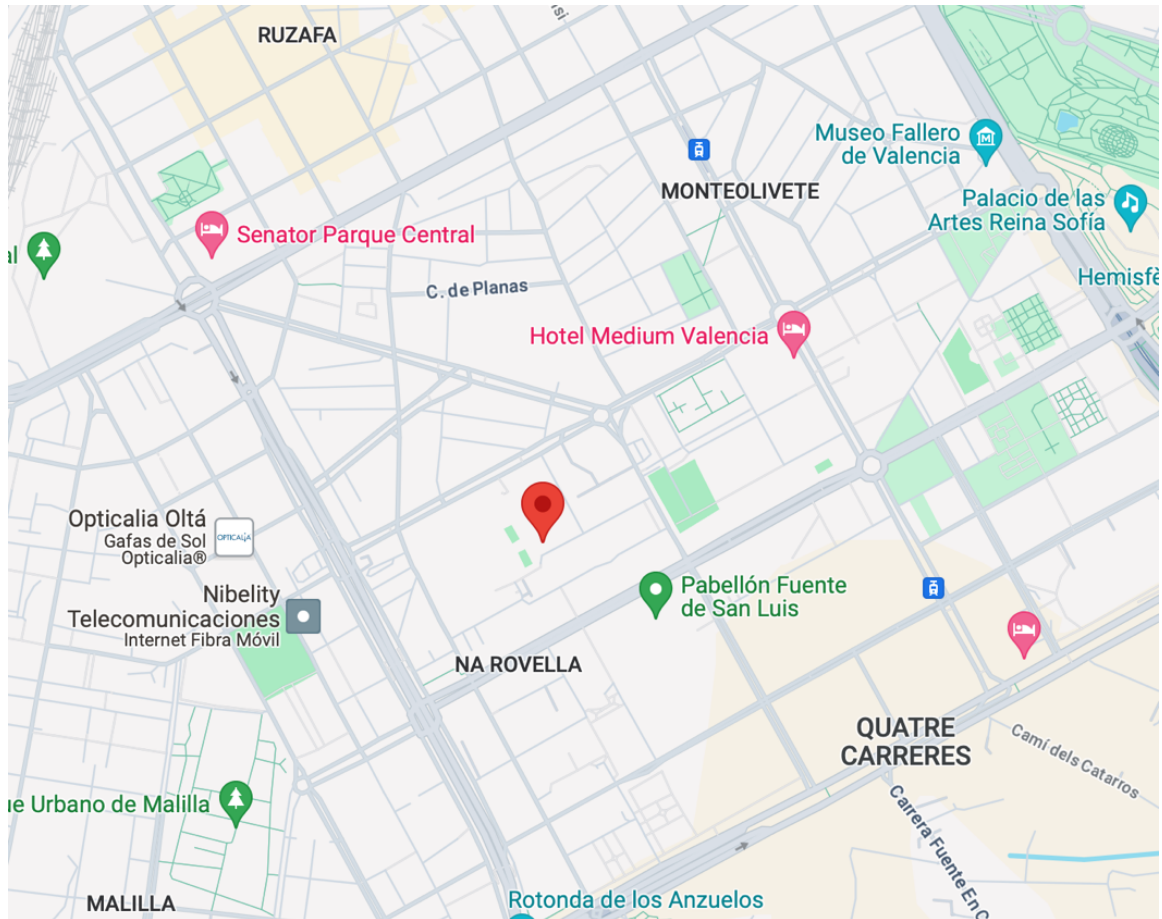


Figura 5. Ubicación del *depot* principal  
Fuente: Google Maps

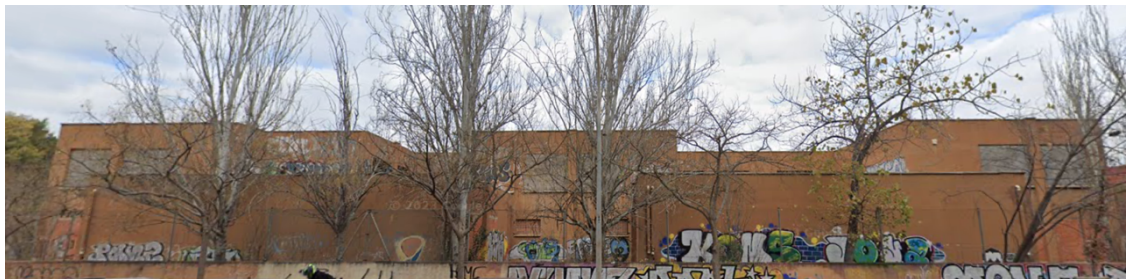


Figura 6. Construcción abandonada  
Fuente: Google Maps



#### 4.1.2. ANÁLISIS DE LAS LÍNEAS URBANAS DE AUTOBÚS

El siguiente paso consiste en seleccionar las líneas de autobús más adecuadas para el caso de estudio; es decir, que tengan una parada cercana al almacén central y recorran los barrios elegidos previamente o sus proximidades. A continuación, en la Figura 7, se muestran las líneas y paradas existentes en la zona a estudiar:



Figura 7. Líneas de autobús de Valencia  
Fuente: Moovit

De esta forma, dos líneas de autobús que se adaptan a las especificaciones son la 13 y la 6; ya que, ambas líneas cruzan el distrito seleccionado y se puede realizar el reparto de paquetes a todos los barrios de dicho distrito. Las paradas de autobús más próximas al almacén central son las siguientes:

- Parc central de Bombers (Línea de autobús 6)
- Germans Maristes (imparell) – Fonteta Sant Lluís (Línea de autobús 13)

Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

En las Figuras 8 y 9 se contemplan los recorridos de las líneas de autobús seleccionadas:



Figura 8. Recorrido de la línea de autobús 13  
Fuente: Moovit

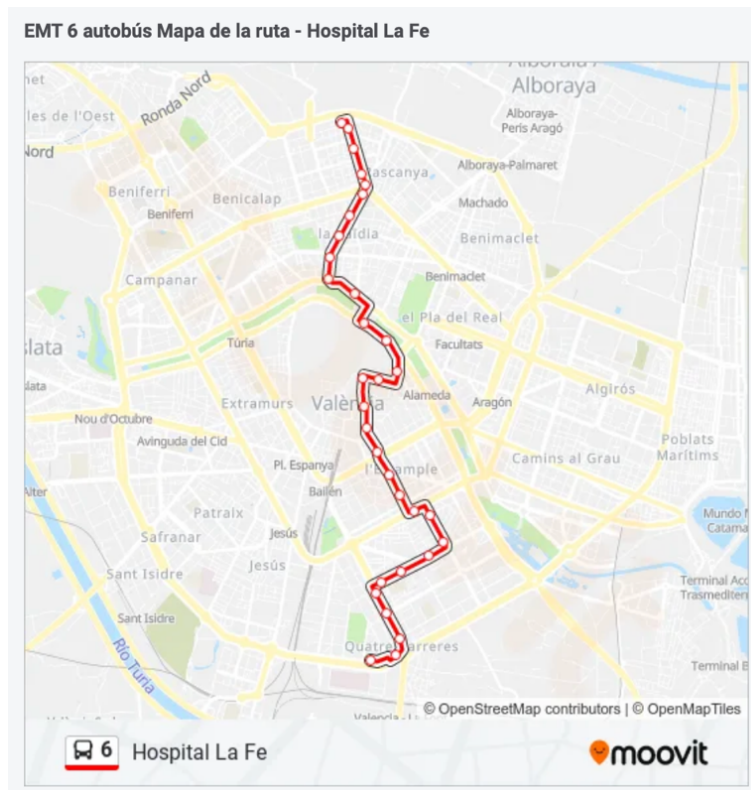


Figura 9. Recorrido de la línea de autobús 6  
Fuente: Moovit

La línea 13 tiene 18 paradas, las cuales se recogen a continuación juntos a sus coordenadas:

- 1: Porta De La Mar (39,471703, -0,367745)
- 2: Amèrica – Marqués del Túria (39,469793, -0,364928)
- 3: Jacinto Benavente – Borriana (39,466511, -0,362789)
- 4: Jacinto Benavente – Peris I Valero (39,463634, -0,361257)
- 5: Antiga Facultat Magisteri (39,461667, -0,360265)
- 6: Museu Faller (39,459216, -0,358454)
- 7: Les Arts (39,456930, -0,356761)
- 8: Inst. Obrer de Val. (Imparell) – Autopista Saler (39,457101, -0,357326)
- 9: Inst. Obrer de Val. (Imparell) – Amado Granell Mesado (39,455366, -0,360616)
- 10: Germans Maristes – José Durán Martínez (39,453762, -0,363172)
- 11: Poliesportiu Fta. Sant Lluís (39,452674, -0,365754)
- 12: Germans Maristes (Imparell) – Fonteta Sant Lluís (39,451756, -0,367828)
- 13: Fonteta Sant Lluís – Ebenista Caselles (39,450158, -0,369641)
- 14: Fonteta Sant Lluís (Parell) – Àngel Villena (39,448535, -0,368522)
- 15: Fonteta Sant Lluís – Riu Sec (39,445985, -0,367120)
- 16: Gravador Jordán – Alabau I Arce (39,444187, -0,367774)
- 17: Centre De Salut Fonteta (39,442693, -0,368156)
- 18: Fonteta de Sant Lluís (39,441869, -0,368496)

Las 32 paradas de la línea 6 y sus coordenadas son las siguientes:

- 19: Torrefiel (39,498618, -0,377211)
- 20: Mercat de Torrefiel (39,498071, -0,376221)
- 21: Sant Doméneç Savio – Josep Esteve (39,496366, -0,375458)
- 22: Sant Doméneç Savio – Mestre Marçal (39,493690, -0,374448)
- 23: Sant Doméneç Savio – Constitució (39,492868, -0,374177)
- 24: Constitució – Dr. Peset Aleizandre (39,491774, -0,374410)
- 25: Constitució – Xest (39,489491, -0,376019)
- 26: Constitució – Sarrión (39,487603, -0,377388)
- 27: Constitució – Màlaga (39,485451, -0,378576)
- 28: Constitució – Pla De La Saïdia (39,483237, -0,378840)
- 29: Pont Dels Serrans (39,481640, -0,375356)
- 30: Comte de Trénor (39,478763, -0,374116)
- 31: Poeta Llorente (39,476955, -0,371213)
- 32: Tetuan – Interior (39,474163, -0,369828)
- 33: Carrer De La Pau (39,473237, -0,372329)
- 34: Marqués De Dosaigües (39,473324, -0,374372)
- 35: Teatre Principal (39,470633, -0,374244)
- 36: Pascual I Genís – Roger de Lloria (39,468453, -0,373913)
- 37: Fèlix Pizcueta – Ciril Amorós (39,465904, -0,372422)
- 38: Pintor Salvador Abril – Mestre J. Serrano (39,463717, -0,370833)
- 39: Pintor Salvador Abril – Maties Perelló (39,462061, -0,369670)
- 40: Peris I Valero – Bisbe Jaume Pérez (39,460418, -0,367502)
- 41: Amado Granell Mesado (Parell) – Lluís Oliag (39,459724, -0,365656)
- 42: Amado Granell Mesado (Parell) – La Plata (39,457005, -0,363616)
- 43: La Plata – Sapadors (39,455859, -0,365484)
- 44: La Plata – Alberola (39,454374, -0,369114)

- 45: La Plata – Ausiàs March (39,453201, -0,372034)
- 46: Ausiàs March – Bernat Descoll (39,452055, -0,372734)
- 47: Ausiàs March – Na Rovella (39,450171, -0,371327)
- 48: Ausiàs March – Pianista Martínez Carrasco (39,447568, -0,369573)
- 49: Rotonda Dels Hams (39,445990, -0,370028)
- 50: La Barraca (39,445499, -0,373282) (Moovit, 2024) (Google Maps, 2024)

#### **4.1.3. ANÁLISIS DE NODOS CLAVE**

Una vez identificados el *depot* principal y las líneas de autobús con las que se va a trabajar, se analizan las paradas de las líneas elegidas para seleccionar las que cubran a más cantidad de población.

Para calcular la distancia máxima que puede recorrer el dron, se realiza la siguiente estimación: puesto que se considera que los drones pueden volar con una autonomía de 20 km; es decir, 10 km ida y 10 km vuelta, y suponiendo que se atiende a un máximo de 10 clientes (teniendo en cuenta que a cada cliente le corresponde un paquete de 20 cm x 15 cm x 15 cm) sin superar ni la carga, ni la capacidad máxima del dron, se estima que la distancia máxima a recorrer por el dron es de 1 km (DJI, 2024).

El algoritmo heurístico de Church y Reville se utiliza para resolver problemas de cobertura de redes de transporte, el objetivo es determinar las ubicaciones óptimas de las paradas de autobús que maximizan el servicio a la población (Companys & Corominas, 1993).

Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

De esta forma, se procede a buscar una solución aproximada al problema de cubrimiento. Para ello, se utilizan los esquemas representados en las Figura 10, en los que se numeran las paradas correspondientes a las líneas 13 y 6, así como la distancia que existe entre cada una de ellas en kilómetros:

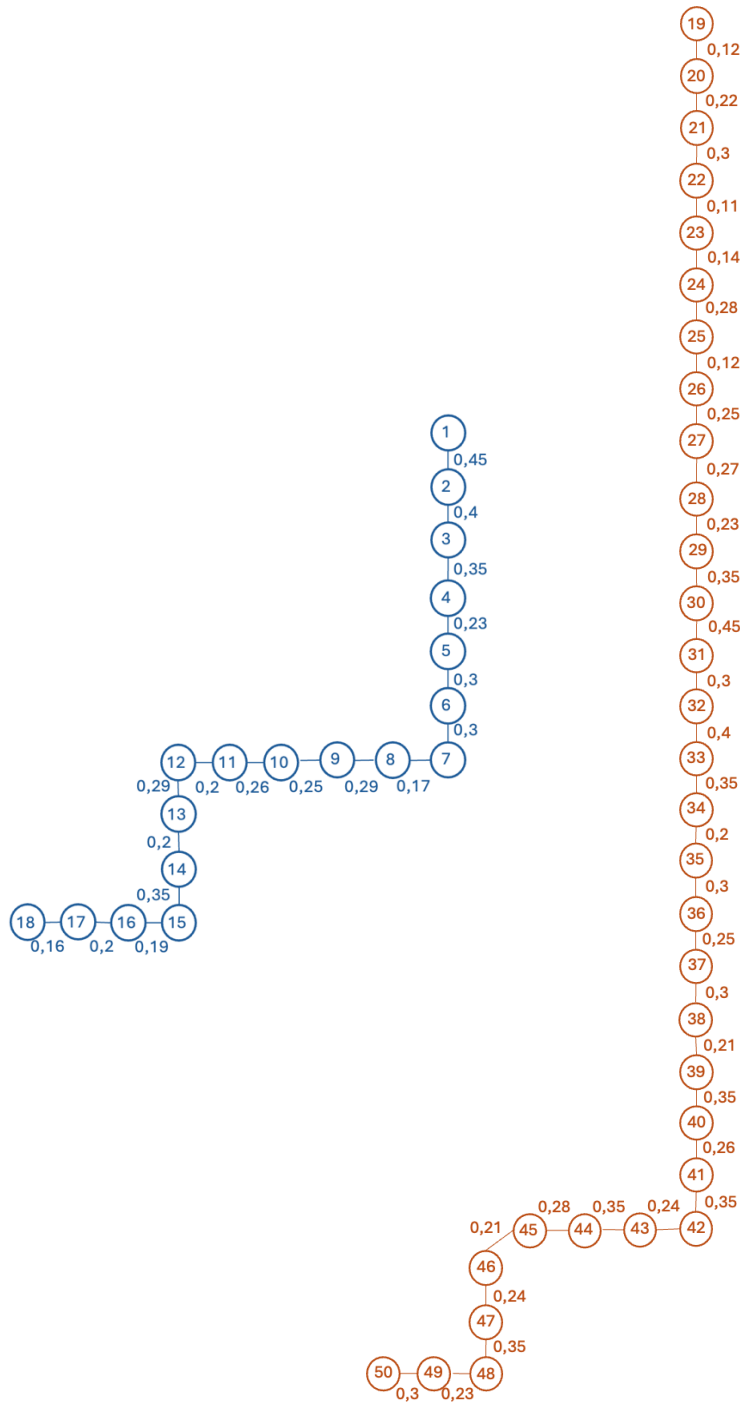


Figura 10. Paradas de la línea de autobús 13 (azul) y línea de autobús 6 (naranja) y distancias entre ellas en kilómetros  
Fuente: Elaboración Propia



Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

También es necesario conocer las distancias que existen entre las paradas de las dos líneas de autobús; ya que, si la distancia es menor de 1 km, el dron podrá cubrir esa parada aunque no pertenezca a la misma línea de autobús. A continuación, en la Tabla 1, se indican todas las distancias menores o igual de un kilómetro que existen entre las dos líneas de autobús:

<b>Paradas:</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>
<b>Distancia a la parada 1 (km)</b>	1	0,75	0,35	0,45	0,65	0,70	0,75	0,95

<b>Paradas:</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>
<b>Distancia a la parada 2 (km)</b>	1	0,70	0,80	1	0,85	0,95	0,90

<b>Paradas:</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>41</b>
<b>Distancia a la parada 3 (km)</b>	0,85	0,90	1	1

<b>Paradas:</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>41</b>
<b>Distancia a la parada 4 (km)</b>	0,95	0,90	0,70	0,70

<b>Paradas:</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>
<b>Distancia a la parada 5 (km)</b>	1	0,95	0,75	0,55	0,80	0,95

<b>Paradas:</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>
<b>Distancia a la parada 6 (km)</b>	0,90	0,75	0,60	0,80

<b>Paradas:</b>	<b>42</b>	<b>43</b>
<b>Distancia a la parada 7 (km)</b>	0,80	1

<b>Paradas:</b>	<b>42</b>	<b>43</b>
<b>Distancia a la parada 8 (km)</b>	0,75	0,90

<b>Paradas:</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>
<b>Distancia a la parada 9 (km)</b>	1	0,80	0,45	0,60	0,95

<b>Paradas:</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>
<b>Distancia a la parada 10 (km)</b>	0,90	0,70	0,60	0,60	0,60	0,35	0,65	0,90

<b>Paradas:</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>
<b>Distancia a la parada 11 (km)</b>	1	0,70	0,50	0,50	0,80	0,80	0,55	0,85

<b>Paradas:</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>
<b>Distancia a la parada 12 (km)</b>	0,90	0,70	0,60	0,60	0,60	0,35	0,65	0,90

<b>Paradas:</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>
<b>Distancia a la parada 13 (km)</b>	1	0,65	0,45	0,45	0,22	0,40	0,60

<b>Paradas:</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>
<b>Distancia a la parada 14 (km)</b>	0,85	0,65	0,65	0,40	0,21	0,40	0,70

<b>Paradas:</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>
<b>Distancia a la parada 15 (km)</b>	1	0,95	0,75	0,40	0,40	0,70

<b>Paradas:</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>
<b>Distancia a la parada 16 (km)</b>	0,85	0,50	0,35	0,70

<b>Paradas:</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>
<b>Distancia a la parada 17 (km)</b>	1	0,65	0,55	0,85

<b>Paradas:</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>
<b>Distancia a la parada 18 (km)</b>	0,80	0,65	0,95

Tabla 1. Distancias en kilómetros entre las dos líneas de autobús  
Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 2, se muestra el procedimiento de aplicación del algoritmo de Church y Revelle para la línea de autobús 13. En cada fila se determina un emplazamiento no elegido anteriormente y las paradas a las que se podría satisfacer desde dicho emplazamiento, teniendo en cuenta que la distancia máxima a recorrer por el dron es de 1 km en ambas direcciones:

Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

Paradas	Puede dar servicio a:									
1	1	2	3							*
2	1	2	3	4	5					*
3	1	2	3	4	5	6				
4	2	3	4	5	6	7	8			
5	2	3	4	5	6	7	8			
6	3	4	5	6	7	8	9			
7	4	5	6	7	8	9	10	11		*
8	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
9	6	7	8	9	10	11	12	13		
10	7	8	9	10	11	12	13	14		
11	7	8	9	10	11	12	13	14		
12	8	9	10	11	12	13	14	15		
13	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
14	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
15	12	13	14	15	16	17	18			*
16	13	14	15	16	17	18				*
17	13	14	15	16	17	18				*
18	14	15	16	17	18					*

Tabla 2. Aplicación del algoritmo de Church y Revelle en la línea de autobús 13  
Fuente: Elaboración Propia

Las paradas marcadas con un asterisco se descartan, ya que existe otra combinación que cubre las mismas o más paradas.

El algoritmo consiste en lo siguiente: en cada iteración se elige una parada no elegida anteriormente, con el criterio de que sea aquella a la que le corresponde un mayor incremento en la clientela potencial cubierta, en relación a la ya cubierta por los emplazamientos elegidos en iteraciones anteriores; el algoritmo finaliza cuando con las paradas elegidas se cubre ya toda la clientela potencial (Companys & Corominas, 1993).

Los algoritmos que se utilizan en el desarrollo del proyecto y la relación que existe entre ellos se sintetizan en la Figura 11:

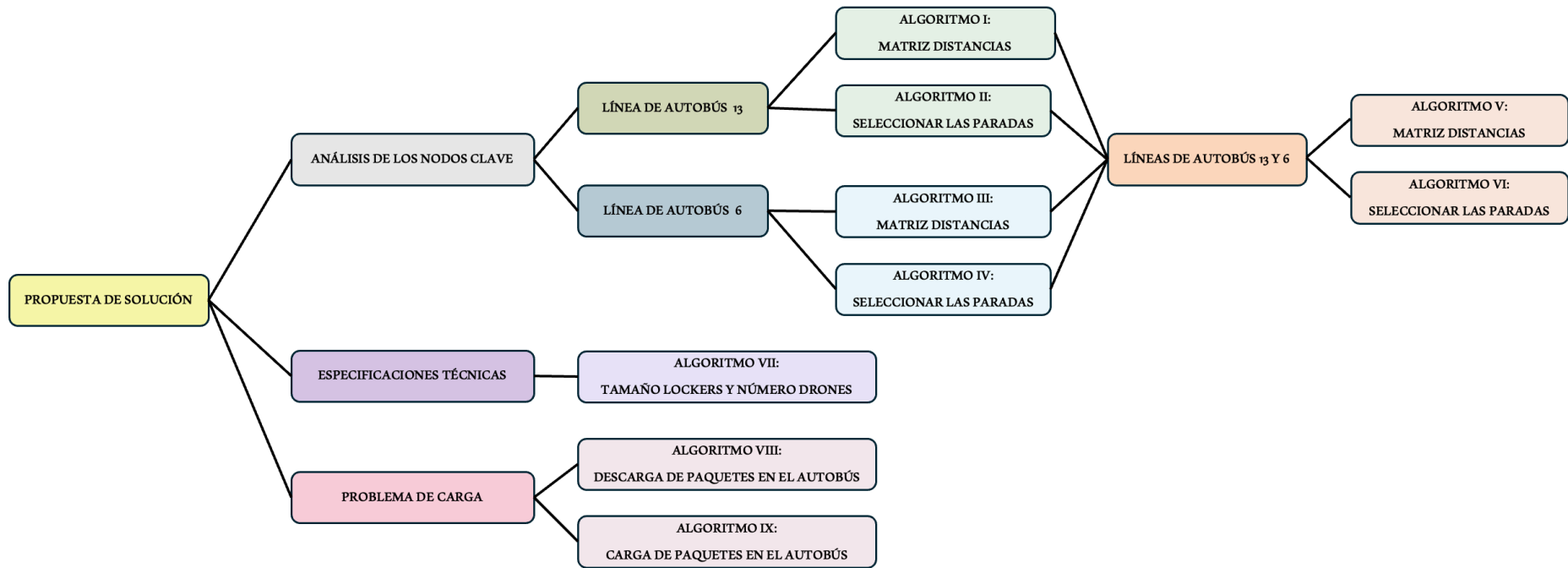


Figura 11. Esquema de los algoritmos a utilizar y la relación que existe entre ellos  
Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se muestran los Algoritmos I y II, empleados para calcular la solución óptima. Con el Algoritmo I, se calculan las paradas a las que puede dar servicio cada parada de la línea 13 y la matriz de distancias correspondiente:

**ALGORITMO I: Matriz distancias para la línea 13 de autobús**

```
# Definir las distancias entre las paradas
distancias = {
    (1, 2): 0.450, (2, 3): 0.400, (3, 4): 0.350, (4, 5): 0.230,
    (5, 6): 0.300, (6, 7): 0.300, (7, 8): 0.170, (8, 9): 0.290,
    (9, 10): 0.250, (10, 11): 0.260, (11, 12): 0.200, (12, 13): 0.290,
    (13, 14): 0.200, (14, 15): 0.350, (15, 16): 0.190, (16, 17): 0.200,
    (17, 18): 0.160
}

# Crear una matriz de 18x18
matriz = [[0] * 18 for _ in range(18)]

# Rellenar la matriz con las distancias
for (p1, p2), distancia in distancias.items():
    matriz[p1 - 1][p2 - 1] = round(distancia, 2)
    matriz[p2 - 1][p1 - 1] = round(distancia, 2) # La matriz es simétrica

# Calcular las distancias acumuladas
for i in range(18):
    for j in range(i + 1, 18):
        if matriz[i][j] == 0: # Solo calcular si la casilla no ha sido asignada
            distancia_acumulada = matriz[i][j-1] + distancias.get((j, j+1), 0)
            matriz[i][j] = round(distancia_acumulada, 2)
            matriz[j][i] = round(distancia_acumulada, 2) # La matriz es simétrica

# Diagonal principal
for i in range(18):
    matriz[i][i] = 1.00

# Imprimir la matriz y las columnas con valores positivos menores o iguales a 1
for i, fila in enumerate(matriz):
    columnas = [j + 1 for j, valor in enumerate(fila) if valor <= 1 and valor > 0]
    print(f"La parada {i + 1} puede dar servicio a las paradas: {' '.join(map(str, columnas))}")

# Imprimir la matriz completa
print("\nMatriz completa:")
for fila in matriz:
    print(fila)
```

Con el Algoritmo II se realizan las iteraciones explicadas anteriormente para seleccionar las mínimas paradas de la línea 13 que cubren a todas las demás:

**ALGORITMO II: Seleccionar las paradas para la línea 13 de autobús**

```
# Definir el número total de paradas
num_paradas = 18

# Crear una matriz inicializada con ceros
matriz_binaria = [[0] * num_paradas for _ in range(num_paradas)]

# Definir las conexiones entre paradas calculadas con el algoritmo [1]
conexiones = {
    1: [1, 2, 3],
    2: [1, 2, 3, 4, 5],
    3: [1, 2, 3, 4, 5, 6],
    4: [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8],
    5: [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8],
    6: [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9],
    7: [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11],
    8: [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12],
    9: [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13],
    10: [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14],
    11: [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14],
    12: [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15],
    13: [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17],
    14: [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18],
    15: [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18],
    16: [13, 14, 15, 16, 17, 18],
    17: [13, 14, 15, 16, 17, 18],
    18: [14, 15, 16, 17, 18]
}

# Actualizar la matriz binaria según las conexiones indicadas
for i in range(1, num_paradas + 1):
    for j in conexiones[i]:
        matriz_binaria[j - 1][i - 1] = 1

# Inicializar variables para hallar la mejor fila y el máximo número de unos
mejor_fila = None
max_unos = 0

# Iterar sobre cada fila
for fila_index, fila in enumerate(matriz_binaria):
    # Contar el número de unos en la fila
    num_unos = sum(fila)

    # Actualizar si encontramos una fila con más unos
    if num_unos > max_unos:
        max_unos = num_unos
        mejor_fila = fila_index
```

```
# Inicializar variables para la segunda iteración
mejor_fil_segunda_iteracion = None
max_unos_segunda_iteracion = 0
filas_seleccionadas = set([mejor_fil])

# Obtener las posiciones donde la mejor fila tiene ceros
posiciones_con_ceros = [i for i, valor in enumerate(matriz_binaria[mejor_fil]) if valor == 0]

# Iterar sobre cada fila
for fila_index, fila in enumerate(matriz_binaria):
    if fila_index not in filas_seleccionadas:
        # Contar el número de unos en las posiciones con ceros en la mejor fila
        num_unos_segunda_iteracion = sum(fila[i] for i in posiciones_con_ceros)

        # Contar el número total de unos en la fila
        num_unos_total = sum(fila)

        # Actualizar si encontramos una fila con más unos o más unos totales en caso de empate
        if num_unos_segunda_iteracion > max_unos_segunda_iteracion or
        (num_unos_segunda_iteracion == max_unos_segunda_iteracion and num_unos_total > max_unos):
            max_unos_segunda_iteracion = num_unos_segunda_iteracion
            mejor_fil_segunda_iteracion = fila_index

filas_seleccionadas.add(mejor_fil_segunda_iteracion)

# Inicializar variables para la tercera iteración
while True:
    mejor_fil_tercera_iteracion = None
    max_unos_tercera_iteracion = 0

    # Sumar las filas seleccionadas previamente para encontrar las posiciones sin cubrir
    suma_filas = [sum(fila[i] for fila in matriz_binaria if matriz_binaria.index(fila) in
    filas_seleccionadas) for i in range(num_paradas)]
    posiciones_sin_cubrir = [i for i, valor in enumerate(suma_filas) if valor == 0]

    # Si no hay posiciones sin cubrir, salimos del bucle
    if not posiciones_sin_cubrir:
        break

    # Iterar sobre cada fila
    for fila_index, fila in enumerate(matriz_binaria):
        if fila_index not in filas_seleccionadas:
            # Contar el número de unos en las posiciones sin cubrir
            num_unos_tercera_iteracion = sum(fila[i] for i in posiciones_sin_cubrir)

            # Contar el número total de unos en la fila
            num_unos_total = sum(fila)

            # Actualizar si encontramos una fila con más unos en las posiciones sin cubrir o más
            unos totales en caso de empate
```

```
if num_unos_tercera_iteracion > max_unos_tercera_iteracion or
(num_unos_tercera_iteracion == max_unos_tercera_iteracion and num_unos_total >
max_unos_tercera_iteracion):
    max_unos_tercera_iteracion = num_unos_tercera_iteracion
    mejor_fila_tercera_iteracion = fila_index

# Añadir la mejor fila de la iteración actual al conjunto de filas seleccionadas
filas_seleccionadas.add(mejor_fila_tercera_iteracion)

# Imprimir las filas seleccionadas
print("Las filas seleccionadas son:", [fila + 1 for fila in filas_seleccionadas])
```

A continuación, se muestra una versión más simplificada del Algoritmo II:

```
num_paradas = 18
matriz_binaria = [[0] * num_paradas for _ in range(num_paradas)]
conexiones = {1: [1, 2, 3], 2: [1, 2, 3, 4, 5], 3: [1, 2, 3, 4, 5, 6], 4: [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], 5: [2, 3, 4, 5,
6, 7, 8], 6: [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9], 7: [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11], 8: [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12], 9: [6, 7, 8,
9, 10, 11, 12, 13], 10: [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14], 11: [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14], 12: [8, 9, 10,
11, 12, 13, 14, 15], 13: [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17], 14: [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18],
15: [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18], 16: [13, 14, 15, 16, 17, 18], 17: [13, 14, 15, 16, 17, 18], 18: [14,
15, 16, 17, 18]}

for i in range(1, num_paradas + 1):
    for j in conexiones[i]:
        matriz_binaria[j - 1][i - 1] = 1

mejor_fila = None
max_unos = 0
for fila_index, fila in enumerate(matriz_binaria):
    num_unos = sum(fila)
    if num_unos > max_unos:
        max_unos = num_unos
        mejor_fila = fila_index

mejor_fila_segunda_iteracion = None
max_unos_segunda_iteracion = 0
filas_seleccionadas = set([mejor_fila])
posiciones_con_ceros = [i for i, valor in enumerate(matriz_binaria[mejor_fila]) if valor == 0]

for fila_index, fila in enumerate(matriz_binaria):
    if fila_index not in filas_seleccionadas:
        num_unos_segunda_iteracion = sum(fila[i] for i in posiciones_con_ceros)
        num_unos_total = sum(fila)
        if num_unos_segunda_iteracion > max_unos_segunda_iteracion or
(num_unos_segunda_iteracion == max_unos_segunda_iteracion and num_unos_total >
max_unos):
            max_unos_segunda_iteracion = num_unos_segunda_iteracion
            mejor_fila_segunda_iteracion = fila_index
```



```
filas_seleccionadas.add(mejor_fila_segunda_iteracion)

while True:
    mejor_fila_tercera_iteracion = None
    max_unos_tercera_iteracion = 0
    suma_filas = [sum(fila[i] for fila in matriz_binaria if matriz_binaria.index(fila) in
filas_seleccionadas) for i in range(num_paradas)]
    posiciones_sin_cubrir = [i for i, valor in enumerate(suma_filas) if valor == 0]
    if not posiciones_sin_cubrir:
        break
    for fila_index, fila in enumerate(matriz_binaria):
        if fila_index not in filas_seleccionadas:
            num_unos_tercera_iteracion = sum(fila[i] for i in posiciones_sin_cubrir)
            num_unos_total = sum(fila)
            if num_unos_tercera_iteracion > max_unos_tercera_iteracion or
(num_unos_tercera_iteracion == max_unos_tercera_iteracion and num_unos_total >
max_unos_tercera_iteracion):
                max_unos_tercera_iteracion = num_unos_tercera_iteracion
                mejor_fila_tercera_iteracion = fila_index
    filas_seleccionadas.add(mejor_fila_tercera_iteracion)

print("Las filas seleccionadas son:", [fila + 1 for fila in filas_seleccionadas])
```

Por lo tanto, el mínimo número de paradas de la línea 13 que cubren a todas las demás son la 3, 8 y 14:

- 3: Jacinto Benavente – Borriana (39,466511, -0,362789)
- 8: Inst. Obrer de Val. (Imparell) – Autopista Saler (39,457101, -0,357326)
- 14: Fonteta Sant Lluís (Parell) – Àngel Villena (39,448535, -0,368522)

Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

En la Tabla 3, se muestra el procedimiento de aplicación del algoritmo de Church y Revelle para la línea de autobús 6. En cada fila se determina un emplazamiento no elegido anteriormente y las paradas a las que se podría satisfacer desde dicho emplazamiento, teniendo en cuenta que la distancia máxima a recorrer por el dron es de 1 km en ambas direcciones:

<b>Paradas</b>	<b>Puede dar servicio a:</b>										
<b>19</b>	19	20	21	22	23	24					*
<b>20</b>	19	20	21	22	23	24					*
<b>21</b>	19	20	21	22	23	24	25	26			*
<b>22</b>	19	20	21	22	23	24	25	26	27		*
<b>23</b>	19	20	21	22	23	24	25	26	27		*
<b>24</b>	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
<b>25</b>	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
<b>26</b>	21	22	23	24	25	26	27	28	29		*
<b>27</b>	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
<b>28</b>	24	25	26	27	28	29	30				*
<b>29</b>	25	26	27	28	29	30	31				
<b>30</b>	27	28	29	30	31	32					
<b>31</b>	29	30	31	32	33						
<b>32</b>	30	31	32	33	34	35					
<b>33</b>	31	32	33	34	35	36					
<b>34</b>	32	33	34	35	36	37					*
<b>35</b>	32	33	34	35	36	37	38				
<b>36</b>	33	34	35	36	37	38	39				
<b>37</b>	34	35	36	37	38	39	40				
<b>38</b>	35	36	37	38	39	40	41				
<b>39</b>	36	37	38	39	40	41	42				
<b>40</b>	37	38	39	40	41	42	43				

Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

<b>41</b>	38	39	40	41	42	43	44				
<b>42</b>	39	40	41	42	43	44	45				
<b>43</b>	40	41	42	43	44	45	46				
<b>44</b>	41	42	43	44	45	46	47				
<b>45</b>	42	43	44	45	46	47	48				
<b>46</b>	43	44	45	46	47	48	49				
<b>47</b>	44	45	46	47	48	49	50				
<b>48</b>	45	46	47	48	49	50					*
<b>49</b>	46	47	48	49	50						*
<b>50</b>	47	48	49	50							*

Tabla 3. Aplicación del algoritmo de Church y Revelle en la línea de autobús 6  
Fuente: Elaboración Propia

Las paradas marcadas con un asterisco se descartan, ya que existe otra combinación que cubre las mismas o más paradas.

Con los Algoritmos III y IV se calcula la solución óptima correspondiente a la línea de autobús 6:

**ALGORITMO III: Matriz distancias para la línea 6 de autobús**

```
# Definir las distancias entre las paradas
distancias = {
    (1, 2): 0.12, (2, 3): 0.22, (3, 4): 0.3, (4, 5): 0.11,
    (5, 6): 0.14, (6, 7): 0.28, (7, 8): 0.12, (8, 9): 0.25,
    (9, 10): 0.27, (10, 11): 0.23, (11, 12): 0.35, (12, 13): 0.45,
    (13, 14): 0.3, (14, 15): 0.4, (15, 16): 0.35, (16, 17): 0.2,
    (17, 18): 0.3, (18, 19): 0.25, (19, 20): 0.3, (20, 21): 0.21,
    (21, 22): 0.35, (22, 23): 0.26, (23, 24): 0.35, (24, 25): 0.24,
    (25, 26): 0.35, (26, 27): 0.28, (27, 28): 0.21, (28, 29): 0.24,
    (29, 30): 0.35, (30, 31): 0.23, (31, 32): 0.3
}

# Crear una matriz de 32x32
matriz = [[0] * 32 for _ in range(32)]

# Rellenar la matriz con las distancias
for (p1, p2), distancia in distancias.items():
    matriz[p1 - 1][p2 - 1] = round(distancia, 2)
    matriz[p2 - 1][p1 - 1] = round(distancia, 2) # La matriz es simétrica

# Calcular distancias acumuladas
for i in range(32):
    for j in range(i + 1, 32):
        if matriz[i][j] == 0: # Solo calcular si la casilla no ha sido asignada
            distancia_acumulada = matriz[i][j - 1] + distancias.get((j, j + 1), 0)
            matriz[i][j] = round(distancia_acumulada, 2)
            matriz[j][i] = round(distancia_acumulada, 2) # La matriz es simétrica

# Diagonal principal
for i in range(32):
    matriz[i][i] = 1.00

# Imprimir la matriz y las columnas con valores positivos menores o iguales a 1
for i, fila in enumerate(matriz):
    columnas = [j + 1 for j, valor in enumerate(fila) if valor <= 1 and valor > 0]
    print(f"La parada {i + 1} puede dar servicio a las paradas: {' '.join(map(str, columnas))}")

# Imprimir la matriz completa
print("\nMatriz completa:")
for fila in matriz:
    print(fila)
```

**ALGORITMO IV: Seleccionar las paradas para la línea 6 de autobús**

```
num_paradas = 32
matriz_binaria = [[0] * num_paradas for _ in range(num_paradas)]
conexiones = {
    1: [1, 2, 3, 4, 5, 6],
    2: [1, 2, 3, 4, 5, 6],
    3: [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8],
    4: [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9],
    5: [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9],
    6: [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10],
    7: [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11],
    8: [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11],
    9: [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12],
    10: [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12],
    11: [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13],
    12: [9, 10, 11, 12, 13, 14],
    13: [11, 12, 13, 14, 15],
    14: [12, 13, 14, 15, 16, 17],
    15: [13, 14, 15, 16, 17, 18],
    16: [14, 15, 16, 17, 18, 19],
    17: [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20],
    18: [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21],
    19: [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22],
    20: [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23],
    21: [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24],
    22: [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25],
    23: [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26],
    24: [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27],
    25: [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28],
    26: [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29],
    27: [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30],
    28: [25, 26, 27, 28, 29, 30, 31],
    29: [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32],
    30: [27, 28, 29, 30, 31, 32],
    31: [28, 29, 30, 31, 32],
    32: [29, 30, 31, 32],
}

for i in range(1, num_paradas + 1):
    for j in conexiones[i]:
        matriz_binaria[j - 1][i - 1] = 1

mejor_fila = None
max_unos = 0
for fila_index, fila in enumerate(matriz_binaria):
    num_unos = sum(fila)
    if num_unos > max_unos:
        max_unos = num_unos
        mejor_fila = fila_index

mejor_fila_segunda_iteracion = None
max_unos_segunda_iteracion = 0
```

```
filas_seleccionadas = set([mejor_filas])
posiciones_con_ceros = [i for i, valor in enumerate(matriz_binaria[mejor_filas]) if valor == 0]

for fila_index, fila in enumerate(matriz_binaria):
    if fila_index not in filas_seleccionadas:
        num_unos_segunda_iteracion = sum(fila[i] for i in posiciones_con_ceros)
        num_unos_total = sum(fila)
        if num_unos_segunda_iteracion > max_unos_segunda_iteracion or
        (num_unos_segunda_iteracion == max_unos_segunda_iteracion and num_unos_total >
        max_unos):
            max_unos_segunda_iteracion = num_unos_segunda_iteracion
            mejor_filas_segunda_iteracion = fila_index

filas_seleccionadas.add(mejor_filas_segunda_iteracion)

while True:
    mejor_filas_tercera_iteracion = None
    max_unos_tercera_iteracion = 0
    suma_filas = [sum(fila[i] for fila in matriz_binaria if matriz_binaria.index(fila) in
    filas_seleccionadas) for i in range(num_paradas)]
    posiciones_sin_cubrir = [i for i, valor in enumerate(suma_filas) if valor == 0]
    if not posiciones_sin_cubrir:
        break
    for fila_index, fila in enumerate(matriz_binaria):
        if fila_index not in filas_seleccionadas:
            num_unos_tercera_iteracion = sum(fila[i] for i in posiciones_sin_cubrir)
            num_unos_total = sum(fila)
            if num_unos_tercera_iteracion > max_unos_tercera_iteracion or
            (num_unos_tercera_iteracion == max_unos_tercera_iteracion and num_unos_total >
            max_unos):
                max_unos_tercera_iteracion = num_unos_tercera_iteracion
                mejor_filas_tercera_iteracion = fila_index
    filas_seleccionadas.add(mejor_filas_tercera_iteracion)

print("Las filas seleccionadas son:", [fila + 1 for fila in filas_seleccionadas])
```

Por lo tanto, el mínimo número de paradas de la línea 6 que cubren a todas las demás son la 24, 29, 35, 42 y 47:

- 24: Constitució – Dr. Peset Aleizandre (39,491774, -0,374410)
- 29: Pont Dels Serrans (39,481640, -0,375356)
- 35: Teatre Principal (39,470633, -0,374244)
- 42: Amado Granell Mesado (Parell) – La Plata (39,457005, -0,363616)
- 47: Ausiàs March – Na Rovella (39,450171, -0,371327)

Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

Una vez determinadas las paradas que cubren a todas las demás de cada línea de autobús independientemente, se procede a mejorar el algoritmo calculando las paradas óptimas teniendo en cuenta ambas líneas de autobús al mismo tiempo. En la Tabla 4, se muestran las conexiones existentes entre las líneas de autobús 6 y 13 cuya distancia es menor a igual a 1 kilómetro:

Paradas	Puede dar servicio a:								
	30	31	32	33	34	35	36	37	
1	30	31	32	33	34	35	36	37	
2	31	32	33	34	35	36	37		*
3	38	39	40	41					*
4	38	39	40	41					*
5	38	39	40	41	42	43			
6	40	41	42	43					*
7	42	43							*
8	42	43							*
9	40	41	42	43	44				
10	42	43	44	45	46	47	48	49	
11	41	42	43	44	45	46	47	48	
12	42	43	44	45	46	47	48	49	*
13	43	44	45	46	47	48	49		*
14	44	45	46	47	48	49	50		
15	45	46	47	48	49	50			*
16	47	48	49	50					*
17	47	48	49	50					*
18	48	49	50						*

Tabla 4. Aplicación del algoritmo de Church y Reville en las línea de autobús 13 y 6  
Fuente: Elaboración Propia

Las paradas marcadas con un asterisco se descartan, ya que existe otra combinación que cubre las mismas o más paradas.

Con los Algoritmos V y VI se obtiene la solución óptima para las líneas de autobús 13 y 6:

**ALGORITMO V: Matriz distancias para las líneas 13 y 6 de autobús**

```
# Definir las distancias entre las paradas
distancias_13 = {
    (1, 2): 0.450, (2, 3): 0.400, (3, 4): 0.350, (4, 5): 0.230,
    (5, 6): 0.300, (6, 7): 0.300, (7, 8): 0.170, (8, 9): 0.290,
    (9, 10): 0.250, (10, 11): 0.260, (11, 12): 0.200, (12, 13): 0.290,
    (13, 14): 0.200, (14, 15): 0.350, (15, 16): 0.190, (16, 17): 0.200,
    (17, 18): 0.160
}

distancias_6 = {
    (19, 20): 0.12, (20, 21): 0.22, (21, 22): 0.3, (22, 23): 0.11,
    (23, 24): 0.14, (24, 25): 0.28, (25, 26): 0.12, (26, 27): 0.25,
    (27, 28): 0.27, (28, 29): 0.23, (29, 30): 0.35, (30, 31): 0.45,
    (31, 32): 0.3, (32, 33): 0.4, (33, 34): 0.35, (34, 35): 0.2,
    (35, 36): 0.3, (36, 37): 0.25, (37, 38): 0.3, (38, 39): 0.21,
    (39, 40): 0.35, (40, 41): 0.26, (41, 42): 0.35, (42, 43): 0.24,
    (43, 44): 0.35, (44, 45): 0.28, (45, 46): 0.21, (46, 47): 0.24,
    (47, 48): 0.35, (48, 49): 0.23, (49, 50): 0.3
}

# Crear una matriz de 50x50
matriz = [[0] * 50 for _ in range(50)]

# Rellenar la matriz con las distancias de la línea 13
for (p1, p2), distancia in distancias_13.items():
    matriz[p1 - 1][p2 - 1] = round(distancia, 2)
    matriz[p2 - 1][p1 - 1] = round(distancia, 2) # La matriz es simétrica

# Rellenar la matriz con las distancias de la línea 6
for (p1, p2), distancia in distancias_6.items():
    matriz[p1 + 17][p2 + 17] = round(distancia, 2)
    matriz[p2 + 17][p1 + 17] = round(distancia, 2) # La matriz es simétrica

# Añadir las nuevas conexiones
nuevas_conexiones = {
    (1, 30): 1, (1, 31): 0.75, (1, 32): 0.35, (1, 33): 0.45, (1, 34): 0.65,
    (1, 35): 0.7, (1, 36): 0.75, (1, 37): 0.95,
    (2, 31): 1, (2, 32): 0.7, (2, 33): 0.8, (2, 34): 1, (2, 35): 0.85,
    (2, 36): 0.95, (2, 37): 0.9,
    (3, 38): 0.85, (3, 39): 0.9, (3, 40): 1, (3, 41): 1,
    (4, 38): 0.95, (4, 39): 0.9, (4, 40): 0.7, (4, 41): 0.7,
    (5, 38): 1, (5, 39): 0.95, (5, 40): 0.75, (5, 41): 0.55, (5, 42): 0.8, (5, 43): 0.95,
    (6, 40): 0.9, (6, 41): 0.75, (6, 42): 0.6, (6, 43): 0.8,
    (7, 42): 0.8, (7, 43): 1,
    (8, 42): 0.75, (8, 43): 0.9,
    (9, 40): 1, (9, 41): 0.8, (9, 42): 0.45, (9, 43): 0.6, (9, 44): 0.95,
    (10, 42): 0.9, (10, 43): 0.7, (10, 44): 0.6, (10, 45): 0.6, (10, 46): 0.6, (10, 47): 0.35, (10, 48):
    0.65, (10, 49): 0.9,
```



Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

```
(11, 41): 1, (11, 42): 0.7, (11, 43): 0.5, (11, 44): 0.5, (11, 45): 0.8, (11, 46): 0.8, (11, 47): 0.55, (11, 48): 0.85,
(12, 42): 0.9, (12, 43): 0.7, (12, 44): 0.6, (12, 45): 0.6, (12, 46): 0.6, (12, 47): 0.35, (12, 48): 0.65, (12, 49): 0.9,
(13, 43): 1, (13, 44): 0.65, (13, 45): 0.45, (13, 46): 0.45, (13, 47): 0.22, (13, 48): 0.4, (13, 49): 0.6,
(14, 44): 0.85, (14, 45): 0.65, (14, 46): 0.65, (14, 47): 0.4, (14, 48): 0.21, (14, 49): 0.4, (14, 50): 0.7,
(15, 45): 1, (15, 46): 0.95, (15, 47): 0.75, (15, 48): 0.4, (15, 49): 0.4, (15, 50): 0.7,
(16, 47): 0.85, (16, 48): 0.5, (16, 49): 0.35, (16, 50): 0.7,
(17, 47): 1, (17, 48): 0.65, (17, 49): 0.55, (17, 50): 0.85,
(18, 48): 0.8, (18, 49): 0.65, (18, 50): 0.95
}

# Rellenar la matriz con las nuevas conexiones
for (p1, p2) in nuevas_conexiones.items():
    matriz[p1 - 1][p2 - 1] = round(distancianc, 2)
    matriz[p2 - 1][p1 - 1] = round(distancianc, 2) # La matriz es simétrica

# Calcular distancias acumuladas de la línea 13
for i in range(18):
    for j in range(i + 1, 18):
        if matriz[i][j] == 0: # Solo calcular si la casilla no ha sido asignada
            distancia_acumulada13 = matriz[i][j-1] + distancias_13.get((j, j+1), 0)
            matriz[i][j] = round(distancia_acumulada13, 2)
            matriz[j][i] = round(distancia_acumulada13, 2) # La matriz es simétrica

# Calcular distancias acumuladas de la línea 6
for i in range(18, 49): # Rango corregido para las filas de la línea 6
    for j in range(i + 1, 50):
        if matriz[i][j] == 0: # Solo calcular si la casilla no ha sido asignada
            distancia_acumulada6 = matriz[i][j - 1] + distancias_6.get((j, j + 1), 0)
            matriz[i][j] = round(distancia_acumulada6, 2)
            matriz[j][i] = round(distancia_acumulada6, 2) # La matriz es simétrica

# Diagonal principal
for i in range(50):
    matriz[i][i] = 1.00

# Imprimir la matriz y las columnas con valores positivos menores o iguales a 1
for i, fila in enumerate(matriz):
    columnas = [j + 1 for j, valor in enumerate(fila) if valor <= 1 and valor > 0]
    print(f"La parada {i + 1} puede dar servicio a las paradas: {' '.join(map(str, columnas))}")

# Imprimir la matriz completa
print("\nMatriz completa:")
for fila in matriz:
    print(fila)
```

**ALGORITMO VI: Seleccionar las paradas para las líneas 13 y 6 de autobús**

```
num_paradas = 50
matriz_binaria = [[0] * num_paradas for _ in range(num_paradas)]
conexiones = {
    1: [1, 2, 3, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37],
    2: [1, 2, 3, 4, 5, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37],
    3: [1, 2, 3, 4, 5, 6, 38, 39, 40, 41],
    4: [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 38, 39, 40, 41],
    5: [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 38, 39, 40, 41, 42, 43],
    6: [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 40, 41, 42, 43],
    7: [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 42, 43],
    8: [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 42, 43],
    9: [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 40, 41, 42, 43, 44],
    10: [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49],
    11: [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48],
    12: [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49],
    13: [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49],
    14: [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50],
    15: [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 45, 46, 47, 48, 49, 50],
    16: [13, 14, 15, 16, 17, 18, 47, 48, 49, 50],
    17: [13, 14, 15, 16, 17, 18, 47, 48, 49, 50],
    18: [14, 15, 16, 17, 18, 48, 49, 50],
    19: [19, 20, 21, 22, 23, 24],
    20: [19, 20, 21, 22, 23, 24],
    21: [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26],
    22: [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27],
    23: [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27],
    24: [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28],
    25: [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29],
    26: [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29],
    27: [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30],
    28: [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30],
    29: [25, 26, 27, 28, 29, 30, 31],
    30: [1, 27, 28, 29, 30, 31, 32],
    31: [1, 2, 29, 30, 31, 32, 33],
    32: [1, 2, 30, 31, 32, 33, 34, 35],
    33: [1, 2, 31, 32, 33, 34, 35, 36],
    34: [1, 2, 32, 33, 34, 35, 36, 37],
    35: [1, 2, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38],
    36: [1, 2, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39],
    37: [1, 2, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40],
    38: [3, 4, 5, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41],
    39: [3, 4, 5, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42],
    40: [3, 4, 5, 6, 9, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43],
    41: [3, 4, 5, 6, 9, 11, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44],
    42: [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45],
    43: [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46],
    44: [9, 10, 11, 12, 13, 14, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47],
    45: [10, 11, 12, 13, 14, 15, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48],
    46: [10, 11, 12, 13, 14, 15, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49],
    47: [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50],
    48: [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 45, 46, 47, 48, 49, 50],
    49: [10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 46, 47, 48, 49, 50],
```

```
50: [14, 15, 16, 17, 18, 47, 48, 49, 50],
}
for i in range(1, num_paradas + 1):
    for j in conexiones[i]:
        matriz_binaria[j - 1][i - 1] = 1

# Selección de la primera fila
mejor_filas = None
max_unos = 0
for fila_index, fila in enumerate(matriz_binaria):
    num_unos = sum(fila)
    if num_unos > max_unos:
        max_unos = num_unos
        mejor_filas = fila_index

filas_seleccionadas = set([mejor_filas])
print(f"Primera fila seleccionada: {mejor_filas + 1}")

# Selección de las siguientes filas
while True:
    mejor_filas_iteracion = None
    max_unos_iteracion = 0
    suma_filas = [sum(fila[i] for fila in matriz_binaria if matriz_binaria.index(fila) in
filas_seleccionadas) for i in range(num_paradas)]
    posiciones_sin_cubrir = [i for i, valor in enumerate(suma_filas) if valor == 0]
    if not posiciones_sin_cubrir:
        break
    for fila_index, fila in enumerate(matriz_binaria):
        if fila_index not in filas_seleccionadas:
            num_unos_iteracion = sum(fila[i] for i in posiciones_sin_cubrir)
            num_unos_total = sum(fila)
            if (num_unos_iteracion > max_unos_iteracion) or (num_unos_iteracion ==
max_unos_iteracion and num_unos_total > sum(matriz_binaria[mejor_filas_iteracion])):
                max_unos_iteracion = num_unos_iteracion
                mejor_filas_iteracion = fila_index
    if mejor_filas_iteracion is None:
        break
    filas_seleccionadas.add(mejor_filas_iteracion)
    print(f"Siguiente fila seleccionada: {mejor_filas_iteracion + 1}")

print("Las filas seleccionadas son:", [fila + 1 for fila in filas_seleccionadas])
```

Por lo tanto, el mínimo número de paradas, teniendo en cuenta la línea 13, la línea 6 y las conexiones que existen entre ellas, cubriendo a todas las demás, son la 2, 5, 10, 14, 24 y 27, representadas en la Figura 12:

- 2: Amèrica – Marqués del Túria (39,469793, -0,364928)
- 5: Antiga Facultat Magisteri (39,461667, -0,360265)
- 10: Germans Maristes – José Durán Martínez (39,453762, -0,363172)
- 14: Fonteta Sant Lluís (Parell) – Àngel Villena (39,448535, -0,368522)
- 24: Constitució – Dr. Peset Aleizandre (39,491774, -0,374410)
- 27: Constitució – Màlaga (39,485451, -0,378576)

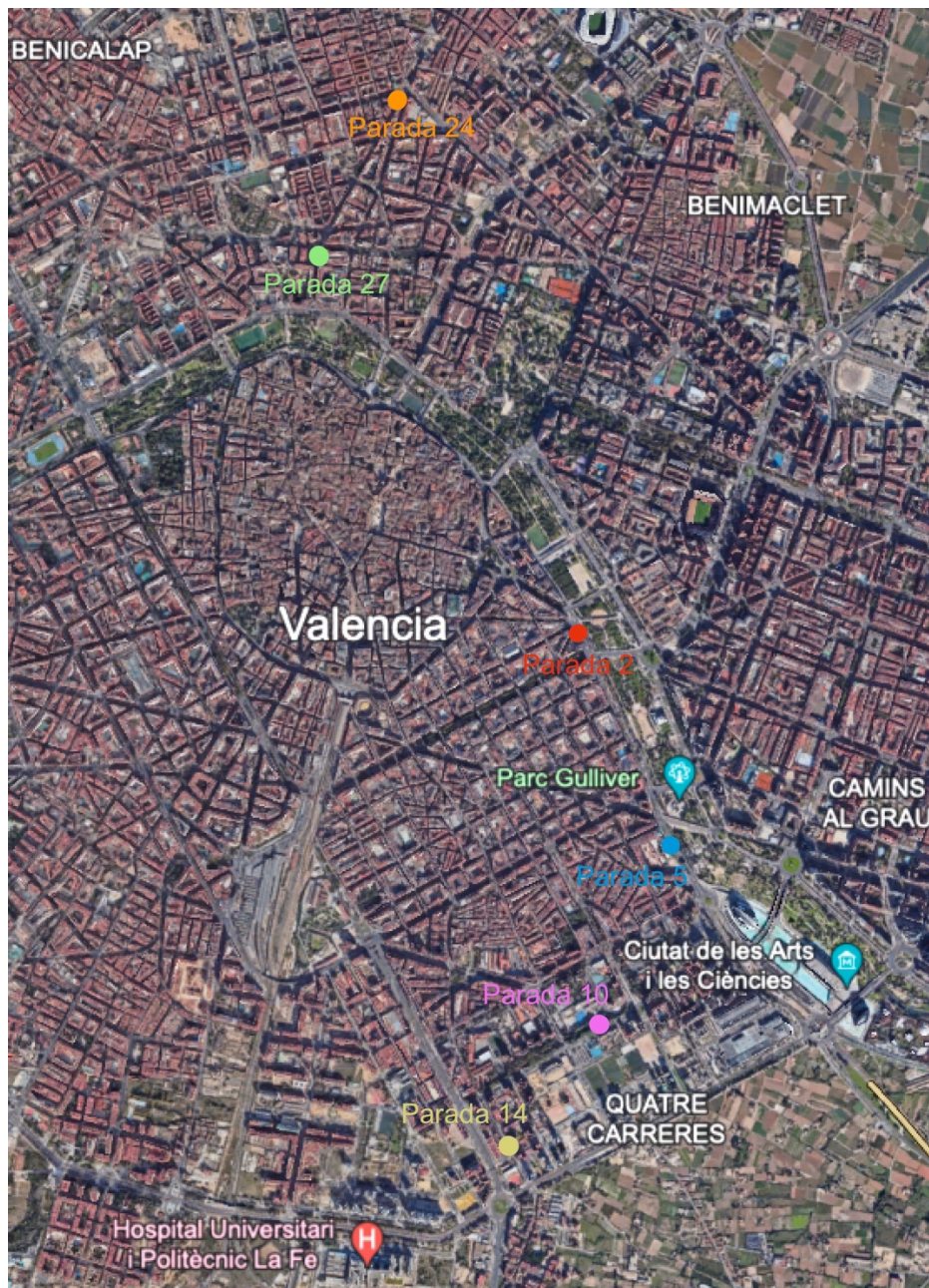


Figura 12. Paradas seleccionadas que cubren a todas las demás  
Fuente: Google Maps; Elaboración Propia

## 4.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

En este apartado se detallan las especificaciones técnicas necesarias para la implementación del sistema de entrega de última milla utilizando drones integrados con el transporte público en la ciudad de Valencia. El objetivo consiste en calcular el número de drones y determinar el tamaño y la ubicación de los *lockers* que se utilizarán para almacenar los paquetes antes de su entrega final al cliente.

### 4.2.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS LOCKERS PRINCIPALES Y SECUNDARIOS

Para comenzar, se analizan dos enfoques distintos que permiten optimizar la operación y asegurar la eficiencia del sistema.

#### ENFOQUE 1

En el enfoque 1 representado en la Figura 13, los drones se almacenan en el *depot* principal junto con los paquetes a repartir. Se cargan en el autobús y se reparten por las 6 paradas seleccionadas previamente. Desde esas paradas, llevan los paquetes a los *lockers* secundarios, donde el cliente puede recoger su pedido; los drones vuelven a la parada y se suben a otro autobús que los lleva de vuelta cerca del *depot*.

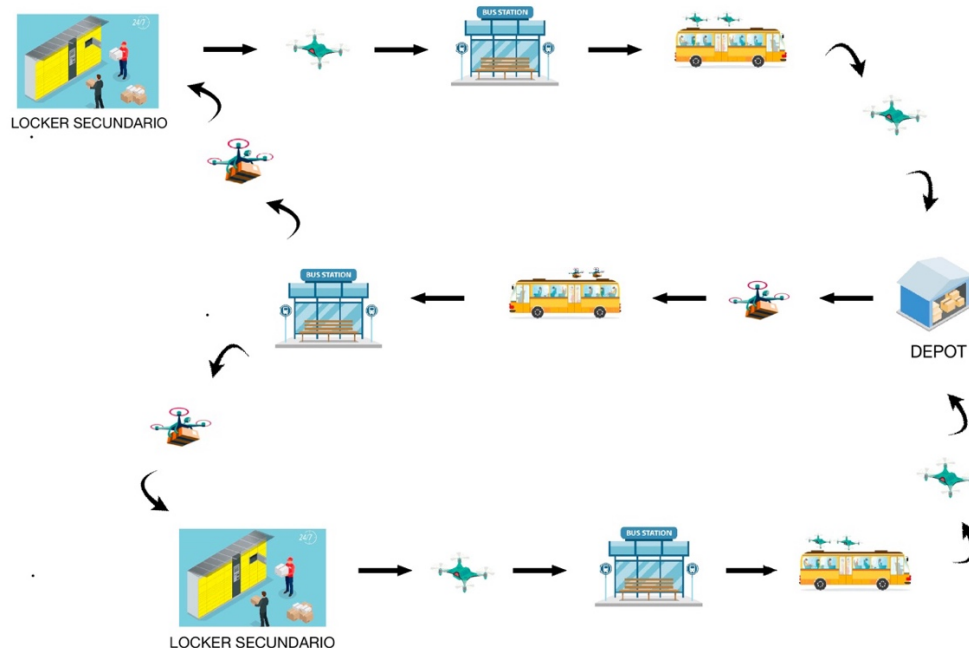


Figura 13. Enfoque 1: Entrega de paquetes utilizando drones integrados con el transporte público  
Fuente: Elaboración Propia

Partiendo de las paradas seleccionadas anteriormente:

- 2: Amèrica – Marqués del Túria (39,469793, -0,364928)
- 5: Antiga Facultat Magisteri (39,461667, -0,360265)
- 10: Germans Maristes – José Durán Martínez (39,453762, -0,363172)
- 14: Fonteta Sant Lluís (Parell) – Àngel Villena (39,448535, -0,368522)
- 24: Constitució – Dr. Peset Aleizandre (39,491774, -0,374410)
- 27: Constitució – Màlaga (39,485451, -0,378576)

Se representan dichas paradas en el plano del Anexo 1. Como se ha mencionado previamente, los drones pueden recorrer una distancia de 1 km desde cada parada. De esta forma, se dibuja un círculo de radio 1 km alrededor de cada parada seleccionada. Seguidamente, se identifican los barrios que se atraviesan recorriendo dicha distancia y se calcula el área proporcional de cada barrio atravesado por la parada, representado en las Tablas 5-10. Teniendo en cuenta la densidad de población de cada barrio, se multiplica por el área calculado previamente y se obtiene el total de habitantes por parada seleccionada.

<b>PARADA 2</b>	<b>ÁREA (m<sup>2</sup>)</b>	<b>hab/km<sup>2</sup></b>	<b>HABITANTES</b>
Exposición	397.633,18	17.646	7.016,64
Mestalla	916.507,08	17.298	15.853,74
Amistat	1.729,15	33.880	58,58
Albors	87.093,86	34.030	2.963,80
Camí fondo	37.454,39	28.860	1.080,93
Penya-Roja	87.854,19	14.410	1.265,98
Monteolivete	69.664,72	40.600	2.828,39
Ruzafa	245.438,27	27.033	6.634,93
Gran Vía	376.086,42	25.407	9.555,23
El Pla del Remei	364.217,99	18.142	6.607,64
Sant Francesc	236.598,15	12.977	3.070,33
La Seu	4.415,6	14.257	62,95
La Xerea	251.341,48	128,40	32,27
Trinitat	49.966,1	13.142	656,65
			<b>57.688,08</b>

Tabla 5. Barrios, área y habitantes correspondientes a la Parada 2

Fuente: Elaboración Propia

<b>PARADA 5</b>	<b>ÁREA (m<sup>2</sup>)</b>	<b>hab/km<sup>2</sup></b>	<b>HABITANTES</b>
Mestalla	396.024,12	17.298	6.850,43
Albors	103.879,46	34.030	3.535,02
Camí Fondo	167.321,57	28.860	4.828,90
Aiora	8.126,30	37.720	306,52
La Creu del Grau	53.119,26	379,20	20,14
Penya-Roja	570.924,55	14.410	8.227,02
Ciutat de las Arts i les Ciències	447.829,39	7.770	3.479,63
Na Rovella	218.325,99	13.960	3.047,83
Monteolivete	444.284,79	40.600	18.037,96
En Corts	96.416,13	33.040	3.185,59
Ruzafa	260.383,34	27.033	7.038,94
Gran Vía	341.689,49	25.407	8.681,30
El Pla del Remei	29.936,31	18.142	543,10
			<b>67.782,40</b>

Tabla 6. Barrios, área y habitantes correspondientes a la Parada 5

Fuente: Elaboración Propia



Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

<b>PARADA 10</b>	<b>ÁREA (km<sup>2</sup>)</b>	<b>hab/km<sup>2</sup></b>	<b>HABITANTES</b>
Monteolivete	435.300,73	40.600	17.673,21
Penya-Roja	113.028,72	14.410	1.628,74
Ciutat de las Arts i les Ciènces	748.161,59	7.770	5.813,22
La Punta	613.434,97	4,50	2,76
La Fonteta de Sant Lluís	54.123,05	12.720	688,45
Malilla	173.651,78	8.879	1.541,85
Na Rovella	551.548,68	13.960	7.699,62
En Corts	345.302,34	33.040	11.408,79
Ruzafa	97.581,36	27.033	2.637,92
			<b>49.094,55</b>

Tabla 7. Barrios, área y habitantes correspondientes a la Parada 10

Fuente: Elaboración Propia

<b>PARADA 14</b>	<b>ÁREA (km<sup>2</sup>)</b>	<b>hab/km<sup>2</sup></b>	<b>HABITANTES</b>
Monteolivete	45.717,82	40.600	1.856,14
Na Rovella	474.557,49	13.960	6.624,82
Ciutat de las Arts i les Ciènces	311.684,44	7.770	2.421,79
La Punta	675.429,73	4,50	3,04
La Fonteta de Sant Lluís	202.655,04	12.720	2.577,77
Malilla	1.159.157,48	8.879	10.292,16
En Corts	266.906,46	33.040	8.818,59
			<b>32.594,31</b>

Tabla 8. Barrios, área y habitantes correspondientes a la Parada 14

Fuente: Elaboración Propia

<b>PARADA 24</b>	<b>ÁREA (km<sup>2</sup>)</b>	<b>hab/km<sup>2</sup></b>	<b>HABITANTES</b>
Pueblo Nuevo	100.291,77	3,23	0,32
Els Orriols	406.769,59	41.840	17.019,24
Sant Llorenç	396.605,72	7.160	2.839,70
Benimaclet	72.135,53	30.660	2.211,68
Trinitat	106.128,51	13.142	1.394,74
Morvedre	327.180,24	23.707	7.756,46
Sant Antoni	252.177,97	38.820	9.789,55
Marchalenes	193.005,23	280	54,04
Tormos	280.831,49	30.396	8.536,15
Benicalap	298.888,67	24.360	7.280,93
Torreïel	729.753,78	37.190	27.139,54
			<b>84.022,35</b>

Tabla 9. Barrios, área y habitantes correspondientes a la Parada 24

Fuente: Elaboración Propia

<b>PARADA 27</b>	<b>ÁREA (km<sup>2</sup>)</b>	<b>hab/km<sup>2</sup></b>	<b>HABITANTES</b>
<b>Torrefiel</b>	232.366,68	37.190	8.641,72
<b>Els Orriols</b>	81.728,38	41.840	3.419,52
<b>Benimaclet</b>	22.643,84	30.660	694,26
<b>Trinitat</b>	317.409,16	13.142	4.171,39
<b>La Seu</b>	83.406,17	14.257	1.189,12
<b>El Mercat</b>	572,69	21.826	12,50
<b>El Carmen</b>	345.202,33	17.455	6.025,51
<b>El Bontànic</b>	123.899,22	17.840	2.210,36
<b>Campanar</b>	80.012,27	11.644	931,66
<b>El Calvari</b>	40.219,38	53.468	2.150,45
<b>Benicalap</b>	164.327,93	24.360	4.003,03
<b>Tormos</b>	280.831,49	30.396	8.536,15
<b>Sant Antoni</b>	252.177,97	38.820	9.789,55
<b>Morvedre</b>	515.459,41	23.707	12.220,00
<b>Les Tendetes</b>	227.867,29	203,60	46,39
<b>Marchalenes</b>	372.606,48	280	104,33
			<b>64.145,94</b>

Tabla 10. Barrios, área y habitantes correspondientes a la Parada 27

Fuente: Elaboración Propia

Por último, dado que se trata de una estimación, se asigna un 1 a la parada desde la que se suministra a un mayor número de habitantes y se calcula la proporción para el resto de paradas. Los valores de los coeficientes calculados son los recogidos en la Tabla 11:

<b>PARADA 2</b>	<b>PARADA 5</b>	<b>PARADA 10</b>	<b>PARADA 14</b>	<b>PARADA 24</b>	<b>PARADA 27</b>
0,69	0,81	0,58	0,39	1	0,76

Tabla 11. Coeficientes de proporcionalidad de las distintas paradas

Fuente: Elaboración Propia

Seguidamente, se estima la cantidad de pedidos online que puede hacer un ciudadano en Valencia. En España, en los últimos años, ha aumentado significativamente el promedio de compras online por persona. Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), en 2021, se estimó que un español realiza una media de 20 a 25 pedidos online al año. En este caso, se analiza la ciudad de Valencia, que corresponde con una de las más grandes de España y con una buena aceptación del comercio electrónico; por lo que, es razonable suponer que los pedidos online en dicha ciudad sean ligeramente superiores (10-15%) a la media española. De esta forma, se llega a la conclusión de que una buena estimación para un ciudadano en Valencia puede corresponder con una media de entre 27 y 29 pedidos online al año, por lo que se trabajará con el valor de 28 pedidos (Instituto Nacional de Estadística (INE), 2024).



A continuación, es necesario calcular la capacidad de reparto de un dron analizando una serie de factores. Por un lado, se debe considerar la capacidad de carga habitual de los drones comerciales para reparto, que se encuentra entre 1 kg y 5 kg, por lo que se supone una capacidad de 3 kg. También se debe trabajar con la autonomía de vuelo que suele oscilar entre 15 y 30 minutos en un rango de 10 a 20 km, dependiendo del peso de la carga y las condiciones ambientales. En este caso, se considera que el dron puede hacer un viaje de ida y vuelta en 3 minutos desde la parada a los *lockers*; ya que, se estima que los *lockers* se encuentran a 1 km (2 km ida y vuelta) y que en ese viaje transporta 5 paquetes de pequeño tamaño. Una vez de vuelta en la parada, se subiría al siguiente autobús de la línea. La línea 13 tiene una duración de viaje total de 17 minutos. La línea 6 tiene una duración de 30 minutos. De esta forma, el dron se cargaría durante el trayecto en el techo del autobús para llegar al *depot* cargado y recoger los siguientes paquetes. El dron se volvería a subir al siguiente autobús y se bajaría en la parada para llevar los paquetes a su *locker* secundario correspondiente (Moovit: Línea 13 de autobús, 2024) (Moovit: Línea 6 de autobús, 2024).

De esta manera, con la línea 13 se estima que se repartirían 5 paquetes en 20 minutos. Con la línea de autobús 6 se repartirían 5 paquetes en 33 minutos. Por lo que, si las entregas se realizan durante 12 horas al día, con la línea 13 y un solo dron se repartirían 180 paquetes. Con la línea 6 y un solo dron se repartirían 109 paquetes.

En cuanto a la carga del dron en el techo del autobús, se selecciona esta opción porque el techo generalmente no se utiliza para otros fines, por lo que hay espacio suficiente para instalar el sistema de carga. Además, se podrían instalar paneles solares para proporcionar energía adicional para la carga de los drones. Otros aspectos a tener en cuenta son la seguridad, el techo es menos accesible, por lo que reduce el riesgo de manipulación no autorizada; y la ventilación para mantener la temperatura de los drones en condiciones óptimas.

Para continuar con el cálculo, se recogen en la Tabla 12 los pedidos demandados por cada parada al día teniendo en cuenta la densidad de población de cada barrio, el área de barrio correspondiente y la superposición de área existente entre las distintas paradas:

PARADA 2	PARADA 5	PARADA 10	PARADA 14	PARADA 24	PARADA 27
1.894 pedidos/día	3.900 pedidos/día	1.104 pedidos/día	1.000 pedidos/día	4.834 pedidos/día	1.408 pedidos/día

Tabla 12. Pedidos demandados al día en cada parada  
Fuente: Elaboración Propia

Considerando que con la línea 13 y un solo dron se repartirían 180 paquetes al día y con la línea 6 y un solo dron 109 paquetes al día, se estiman los drones que serían necesarios en cada parada, recogidos en la Tabla 13:

PARADA 2	PARADA 5	PARADA 10	PARADA 14	PARADA 24	PARADA 27
14 drones	27 drones	8 drones	7 drones	34 drones	10 drones

Tabla 13. Drones necesarios en cada parada  
Fuente: Elaboración Propia

Dado que el dron solo puede repartir los paquetes de tamaño más reducido y que la mayor parte de los pedidos realizados son de dicho tamaño, se ha considerado que se podrán repartir con el dron el 75% de los pedidos estimados al año. Además, se debe tener en cuenta que los cálculos realizados corresponden con una estimación, que puede variar en función de factores ambientales, el sistema de recarga de baterías y las rutas.

Por lo tanto, serían necesarios un total de 100 drones para atender la demanda estudiada. Se decide descartar esta opción y estudiar otro enfoque, ya que el número de drones calculado es demasiado elevado.

## ENFOQUE 2

A continuación, dado que el número de drones calculado y, por tanto, el tráfico aéreo, es demasiado elevado, se procede a desarrollar otro enfoque más simple para optimizar el proceso.

El nuevo enfoque representado en la Figura 14 consiste en cargar los autobuses con todos los paquetes a repartir con drones en las paradas Parc.Central de Bombers (Línea de autobús 6) y Germans Maristes (imparell) – Fonteta Sant Lluís (Línea de autobús 13), próximas al *depot* principal. Al lado de las seis paradas seleccionadas, se situará un *locker* principal de gran tamaño en el que se puedan almacenar los paquetes. Dichos paquetes serán descargados con drones cuando el autobús se detenga en las paradas. Desde el *locker* principal, cada dron reparte los paquetes a los *lockers* secundarios, de tamaño menor. El dron se desplaza continuamente desde el *locker* principal hasta los *lockers* secundarios hasta que se le acaba la batería. En el *locker* principal existe una zona de carga y almacenamiento de baterías. El cliente podrá recoger su pedido en dichos *lockers* secundarios con un código de pedido. Tanto para comenzar como para finalizar el reparto cada día, por seguridad, los drones se almacenan en el *depot* y aprovechan la línea de autobús para bajarse en las paradas correspondientes (cuando empieza el día) o subirse al autobús (cuando finaliza el día).

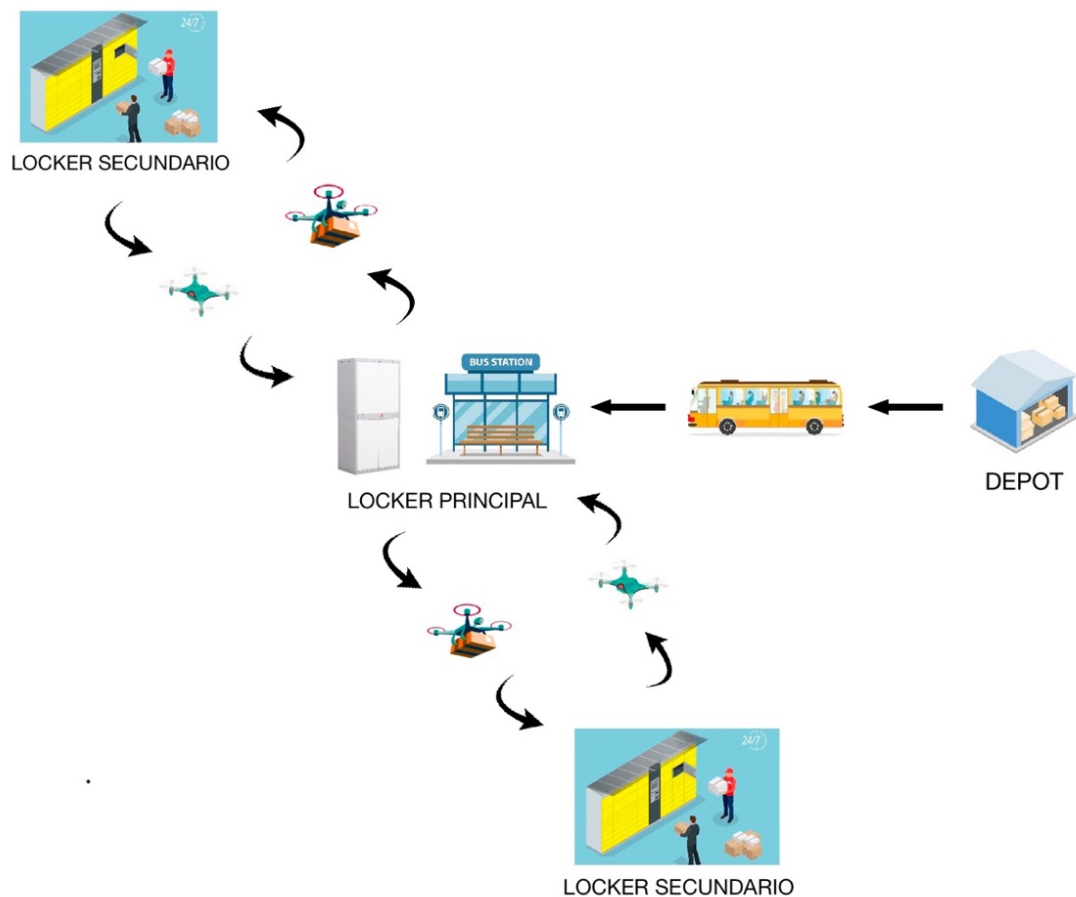


Figura 14. Enfoque 2: Entrega de paquetes utilizando drones integrados con el transporte público  
Fuente: Elaboración Propia

Para comenzar, se ubican los *lockers* secundarios y se calcula su tamaño. Se decide situar los *lockers* secundarios cercanos a supermercados, realizando acuerdos comerciales con los mismos; ya que, son lugares que se transitan diariamente, por lo que no sería una molestia para el cliente recoger su pedido. Además, la ubicación de los supermercados corresponde con las zonas más densas. Para ello, se ubican los supermercados en el mapa del Anexo 1; se ha decidido trabajar con las cadenas de supermercado Mercadona y Consum, ya que constituyen el mayor número de supermercados en Valencia. Los puntos rojos corresponden con los supermercados Mercadona y los verdes con Consum.

A continuación, se indican los supermercados que dan servicio a cada parada:

**Parada 2:** Le corresponden 8 supermercados, pero 4 supermercados solo abastecen a la parada 2.

**Parada 5:** Le corresponden 8 supermercados, pero 2 supermercados solo abastecen a la parada 5 y 4 supermercados comparten las paradas 2 y 5.

**Parada 10:** Le corresponden 8 supermercados, pero 4 supermercados comparten las paradas 10 y 5 y 2 supermercados comparten las paradas 10 y 2.

**Parada 14:** Le corresponden 6 supermercados, pero 2 supermercados solo abastecen a la parada 14 y 4 supermercados comparten las paradas 10 y 14.

**Parada 24:** Le corresponden 12 supermercados, pero 4 supermercados solo abastecen a la parada 24.

**Parada 27:** Le corresponden 13 supermercados, pero 5 supermercados solo abastecen a la parada 27 y 8 supermercados comparten las paradas 24 y 27.

Teniendo en cuenta los solapes existentes entre las distintas paradas, se consideran los pedidos demandados por cada parada al día recogidos en la Tabla 12. Es decir, un total de 14.140 pedidos al día entre todas las paradas.

Sabiendo el número de pedidos que realizan los habitantes al día; el tamaño medio de los paquetes se suponen paquetes pequeños de 20 cm x 15 cm x 15 cm; el tiempo máximo de permanencia en los *lockers* de 5 días y los supermercados disponibles alrededor de cada parada, se puede calcular el tamaño de los *lockers* secundarios.

Para la parada 5, se han obtenido 3.900 pedidos/día que pueden permanecer 5 días en los *lockers* secundarios; por lo que deben poder almacenar 19.500 pedidos. Para la parada 5 hay disponibles 8 supermercados donde se colocarán los *lockers*. En cada *locker* deben caber 2.438 paquetes de dimensiones 20 cm x 15 cm x 15 cm (4.500 cm<sup>3</sup>/paquete). De esta forma, se obtiene el tamaño de *locker* que debe ser de 10,97 metros cúbicos.

Para la parada 2, se han calculado 1.894 pedidos al día y se dispone de 4 supermercados (en la zona que no se solapa con la parada 5, ya calculada). Por lo tanto, deben almacenarse 2.368 paquetes que da lugar a un tamaño de *locker* de 10,66 metros cúbicos.

Con respecto a la parada 10, se han calculado 1.104 pedidos/día en 4 supermercados. Debe haber espacio para 1380 pedidos con un tamaño de *locker* de 6,21 metros cúbicos.

La parada 14 debe tener capacidad para 1.000 pedidos/día en 2 supermercados; lo cual da lugar a 2500 paquetes que corresponden con un tamaño de *locker* de 11,25 metros cúbicos.

Para la parada 24, se han obtenido 4.834 pedidos/día y 12 supermercados. En cada *locker* debe haber sitio para 2014 paquetes. Los *lockers* deben tener un volumen mínimo de 9,06 metros cúbicos.

En cuanto a la parada 27, se han calculado 1.408 pedidos al día y 5 supermercados. Los *lockers* deben tener un tamaño de 6,34 metros cúbicos para almacenar 1.408 paquetes.

Finalmente, se eligen módulos de *lockers* secundarios de dimensiones 2 m x 2 m x 1 m, representados en la Figura 15, que permiten el almacenamiento de los productos en base a los requisitos expuestos. Dichos *lockers* se instalarán junto a los supermercados. En la parada 5, se necesitan 3 módulos en cada supermercado; es decir, un total de 24 *lockers* secundarios. En la parada 2, 3 módulos en cada supermercado, 12 *lockers* en total. En la parada 10, 2 módulos en cada supermercado, 8 *lockers*. En la parada 14, 3 módulos por supermercado, 6 *lockers* en total. En la parada 24, 3 módulos; es decir, 36 *lockers*. En la parada 27, 2 módulos y 10 *lockers* en total. Por lo tanto, serán necesarios 96 *lockers* secundarios.

A continuación, se calcula el tamaño de los *lockers* principales. Conociendo el número de pedidos que debe satisfacer cada parada, el tamaño medio de los paquetes y el tiempo que se tarda en distribuir los pedidos a los *lockers* secundarios, se puede calcular el tamaño de los *lockers* principales.

Para el caso de la parada 5, el *locker* principal debe ser capaz de almacenar los pedidos que serán distribuidos diariamente a los 8 *lockers* secundarios. Se considera que estos paquetes pueden ser entregados a los *lockers* secundarios diariamente, por lo que el *locker* principal necesita almacenar la cantidad diaria de pedidos. En la parada 5, se deberán almacenar 3.900 pedidos/día que ocupan 4.500 cm<sup>3</sup>/paquete, lo que da lugar a un volumen total diario de 17,55 metros cúbicos.

Para la parada 2, 1.894 pedidos/día, dando lugar a un volumen total diario de 8,52 metros cúbicos.

En lo que respecta a la parada 10, 1.104 pedidos/día, necesitando 4,97 metros cúbicos.

Para la parada 14, 1.000 pedidos/día, por lo que se necesitan 4,50 metros cúbicos.

Para la parada 24, 4.834 pedidos/día, por lo que serán necesarios 21,75 metros cúbicos.

Para la parada 27, 1.408 pedidos/día, que da lugar a un volumen de 6,34 metros cúbicos.

De esta forma, se eligen *lockers* principales de dimensiones 3 m x 3 m x 2,5 m, representados en la Figura 16, que permiten el almacenamiento de los productos para posteriormente ser repartidos con ayuda de los drones a los *lockers* secundarios. Además, en estos *lockers* se ha contado con espacio para el almacenamiento de las baterías. Serán necesarios 6 *lockers* principales, uno en cada parada de autobús seleccionada.

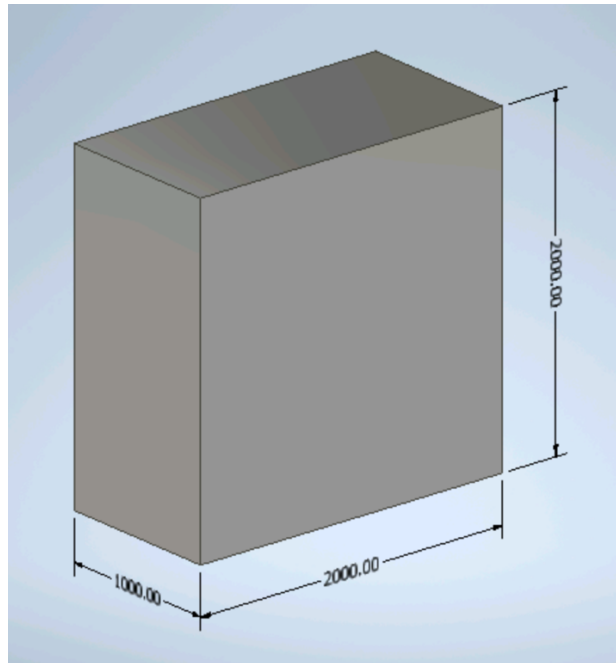


Figura 15. Dimensiones *locker* secundario  
Fuente: Elaboración Propia

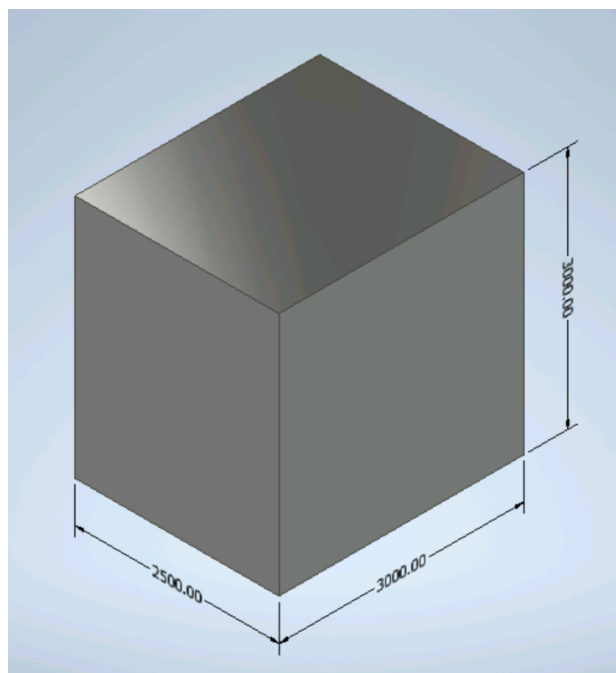


Figura 16. Dimensiones *locker* principal  
Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS DRONES

Por último, para calcular el número de drones necesarios para repartir los paquetes desde el *locker* principal a los *lockers* secundarios se parte de los siguientes datos:

- Capacidad de carga del dron estimada: 5 paquetes.
- Se supone que los drones operan durante 12 horas al día.
- Distancia promedio a los *lockers* secundarios: 1 km.
- Velocidad del dron: 10 km a 15 minutos (40 km/h).
- Los pedidos diarios correspondientes a cada parada mencionados previamente.

El tiempo de viaje del dron desde el *locker* principal al secundario es el calculado en la ecuación [3]:

$$\text{Tiempo de viaje (ida y vuelta)} = \frac{2 \times 1 \text{ km}}{40 \text{ km/h}} = \frac{2 \text{ km}}{40 \text{ km/h}} = 0,05 \text{ horas [3]}$$

Se estima un tiempo de carga y descarga de 5 minutos, por lo que el tiempo total de ciclo se calcula con la ecuación [4]:

$$\text{Tiempo total de ciclo} = 0,05 \text{ horas} + \frac{5}{60} \text{ horas} = 0,13 \text{ horas [4]} \quad (\text{Mohammad Imran, Mishra, \& Won, 2023})$$

Para la parada 5, se trabaja con 3.900 pedidos diarios y se considera que el dron carga 5 paquetes por viaje, con las ecuaciones [5] y [6] se obtienen el número de viajes necesarios y de ciclos por dron y por día:

$$\text{Número de viajes necesarios} = \frac{3900 \frac{\text{paquetes}}{\text{día}}}{5 \frac{\text{paquetes}}{\text{viaje}}} = 780 \frac{\text{viajes}}{\text{día}} [5]$$

$$\text{Número de ciclos por dron por día} = \frac{12 \frac{\text{horas}}{\text{día}}}{0,13 \frac{\text{horas}}{\text{ciclo}}} \approx 90,23 \frac{\text{ciclos}}{\text{día}} [6]$$

Por lo que el número de drones se calcula con la ecuación [7]:

$$\text{Número de drones} = \frac{780 \frac{\text{viajes}}{\text{día}}}{57,69 \frac{\text{ciclos}}{\text{día}}} \approx 8,65 [7]$$

Por lo tanto, se necesitarían 9 drones para cubrir los 3.900 pedidos diarios correspondientes a la parada 5.

Realizando los mismos cálculos, para la parada 2 se necesitarían un total de 5 drones; para la 10, 3 drones; para la 14, 3 drones; para la 24, 11 drones y para la parada 27, 4 drones. Lo que sumaría un total de 35 drones de reparto.

Para realizar el cálculo descrito anteriormente se utiliza el Algoritmo VII:

**ALGORITMO VII: Cálculo del tamaño de los lockers principales y secundarios y del número de drones necesarios siguiendo el Enfoque 2**

```
import math

# Datos de las paradas y supermercados
paradas = {
    'parada_2': {'pedidos_diarios': 1894, 'supermercados': 4},
    'parada_5': {'pedidos_diarios': 3900, 'supermercados': 8},
    'parada_10': {'pedidos_diarios': 1104, 'supermercados': 4},
    'parada_14': {'pedidos_diarios': 1000, 'supermercados': 2},
    'parada_24': {'pedidos_diarios': 4834, 'supermercados': 12},
    'parada_27': {'pedidos_diarios': 1408, 'supermercados': 5}
}

# Dimensiones de los paquetes en metros cúbicos
volumen_paquete = 0.0045 # 20 cm x 15 cm x 15 cm

# Función para calcular tamaño de lockers secundarios
def calcular_tamano_locker_secundario(pedidos_diarios, num_supermercados):
    capacidad_diaria = pedidos_diarios * 5 # Capacidad necesaria durante 5 días
    capacidad_por_supermercado = capacidad_diaria / num_supermercados
    volumen_locker = capacidad_por_supermercado * volumen_paquete
    return volumen_locker

# Función para calcular tamaño de lockers principales
def calcular_tamano_locker_principal(pedidos_diarios):
    volumen_locker = pedidos_diarios * volumen_paquete
    return volumen_locker

# Función para calcular el número de drones necesarios
def calcular_numero_drones(pedidos_diarios):
    capacidad_dron = 5 # Paquetes por viaje
    tiempo_operacion_diaria = 12 # Horas de trabajo diario
    distancia_media_km = 1 # Distancia promedio a los lockers secundarios en km
    velocidad_media_kmh = 40 # Velocidad media del dron en km/h

    # Tiempo de viaje ida y vuelta promedio en horas
    tiempo_viaje_hr = (2 * distancia_media_km) / velocidad_media_kmh

    # Tiempo total de ciclo incluyendo carga y descarga en horas
    tiempo_ciclo_hr = tiempo_viaje_hr + (5 / 60) # 5 minutos de carga y descarga

    # Cálculo de viajes necesarios por día
    viajes_diarios = pedidos_diarios / capacidad_dron

    # Cálculo de ciclos por dron por día
    ciclos_diarios = tiempo_operacion_diaria / tiempo_ciclo_hr

    # Cálculo del número de drones necesarios
```



Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

```
num_drones = math.ceil(viajes_diarios / ciclos_diarios)

return num_drones

# Calcular tamaños de lockers secundarios y principales para cada parada
for parada, datos in paradas.items():
    print(f"Para la parada {parada}:")

    # Tamaño de locker secundario
    tamaño_locker_secundario = calcular_tamaño_locker_secundario(datos['pedidos_diarios'], datos['supermercados'])
    print(f"Tamaño de locker secundario requerido: {tamaño_locker_secundario:.3f} metros cúbicos")

    # Tamaño de locker principal
    tamaño_locker_principal = calcular_tamaño_locker_principal(datos['pedidos_diarios'])
    print(f"Tamaño de locker principal requerido: {tamaño_locker_principal:.3f} metros cúbicos")

    # Número de drones necesarios
    num_drones = calcular_numero_drones(datos['pedidos_diarios'])
    print(f"Número de drones necesarios: {num_drones}\n")
```

El dron seleccionado es el *DJI FlyCart 30* de la Figura 17, el cual cumple con las características necesarias para llevar a cabo el reparto. Dicho dron es capaz de detectar y evadir obstáculos, además de planificar rutas; también resiste condiciones meteorológicas extremas. Además, indicadores de luz y sonido garantizan la seguridad al despegar y aterrizar. La carga útil máxima es de 40 kg y la capacidad máxima es de 70 litros, por lo que existe margen suficiente para aumentar la carga a repartir. La distancia de vuelo máxima es de 28 km y la velocidad de vuelo máxima es de 20 m/s, las cuales son suficientes para el estudio realizado (DJI, 2024).



Figura 17. Dron de reparto DJI FlyCart 30  
Fuente: DJI

### 4.3. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ENTREGA

Este apartado se centra en el desarrollo y aplicación de modelos de optimización que permiten mejorar la eficiencia del sistema de entrega.

#### 4.3.1. PROBLEMA DE CARGA

A continuación, se analiza el problema de la carga y descarga de los paquetes en el autobús. De esta forma, se determina la capacidad de almacenamiento que debe tener el autobús, así como el tiempo y número de drones necesarios para llevar a cabo este procedimiento.

#### DESCARGA AUTOBÚS

Para calcular la descarga del autobús se parte de los pedidos al día calculados previamente y recogidos en la Tabla 12.

Se supone que el autobús está parado unos 12 minutos en la parada 24, que corresponde con la parada con mayor número de habitantes, por lo que habrá más tránsito de personas.

Para calcular cuántos paquetes se pueden descargar de un autobús en 12 minutos utilizando un dron, se necesita calcular el tiempo que toma el dron en realizar un ciclo completo de ida y vuelta entre el autobús y el *locker* principal.

Siguiendo con las suposiciones anteriores, la velocidad del dron se considera de 40 km/h, por lo que en un minuto, el dron puede volar 666,67 metros. Suponiendo que la distancia entre el autobús y el *locker* principal sea  $D$  metros (considerando una distancia de 5 metros para realizar el cálculo correspondiente), el tiempo de ida y vuelta se calcula con la ecuación [8]:

$$T_{vuelo} = \frac{2D}{666,67} \quad [8]$$

También se debe tener en cuenta el tiempo de carga en el autobús y el tiempo de descarga en el *locker* principal,  $T_c$ , es de 1 minuto. Por lo tanto, el tiempo total para un ciclo completo es el tiempo de vuelo más el tiempo de carga y descarga, como se observa en la ecuación [9].

$$T_T = \frac{2D}{666,67} + T_c \quad [9]$$

Se puede calcular el número de ciclos que se pueden dar en el tiempo que el autobús está parado con la ecuación [10]:

$$\text{Número de ciclos} = \frac{T_p}{\left(\frac{2D}{666,67} + T_c\right)} \quad [10]$$

El número de ciclos se redondea hacia abajo; ya que, el dron no puede completar una fracción de ciclo.

Por último, para calcular el número de paquetes, como el dron puede cargar 5 paquetes, en la ecuación [11] se multiplica el número de ciclos por los 5 paquetes:

$$\text{Número de paquetes} = 5 \times \text{Número de ciclos} \quad [11]$$

Suponiendo:  $T_c = 1 \text{ minuto}$  y  $D = 5 \text{ metros}$ , el dron puede descargar 55 paquetes en 12 minutos.

Para el resto de paradas se establece una proporcionalidad con respecto a la parada 24 y se obtienen los tiempos recogidos en la Tabla 14 del autobús parado en la estación:

PARADA 2	PARADA 5	PARADA 10	PARADA 14	PARADA 24	PARADA 27
4,70 minutos	9,68 minutos	2,74 minutos	2,48 minutos	12 minutos	3,50 minutos

Tabla 14. Tiempo que el autobús debe permanecer estacionado en cada parada mientras que el dron descarga los paquetes

De esta forma, se pueden calcular los paquetes que puede descargar un dron en cada parada. En la parada 2, puede descargar 20 paquetes; en la parada 5, 45 paquetes; en la parada 10, 10 paquetes; en la parada 14, 10 paquetes; y en la parada 27, 15 paquetes. Es decir, un total de 155 paquetes en un autobús.

Para optimizar el proceso, se va a trabajar con dos drones en cada parada, por lo que cada en cada autobús se cargarán 310 paquetes.

El tamaño considerado de los paquetes es 20 cm x 15 cm x 15 cm (4.500 cm<sup>3</sup>/paquete). De esta forma, se puede calcular el espacio de almacenamiento necesario en cada autobús con la ecuación [12]:

$$\text{Almacenamiento autobús} = 0,0045 \frac{m^3}{\text{paquete}} \times 310 \text{ paquetes} = 1,40 m^3 \text{ [12]}$$

Con el Algoritmo VIII se calcula la descarga de los paquetes del autobús:

**ALGORITMO VIII: Cálculo de la descarga de paquetes del autobús**

```
import math

def calcular_descarga_autobus(pedidos_por_parada, tiempo_parado_por_parada,
capacidad_dron, velocidad_dron_kmh, distancia_m, tiempo_carga_descarga):
    # Velocidad del dron en m/min
    velocidad_dron_mpm = (velocidad_dron_kmh * 1000) / 60

    # Tiempo de vuelo ida y vuelta en minutos
    tiempo_vuelo_ida_vuelta = (2 * distancia_m) / velocidad_dron_mpm

    # Tiempo total para un ciclo completo
    tiempo_total_ciclo = tiempo_vuelo_ida_vuelta + tiempo_carga_descarga

    # Número de ciclos y paquetes para cada parada
    paquetes_por_parada = []
    for tiempo_parado in tiempo_parado_por_parada:
        num_ciclos = math.floor(tiempo_parado / tiempo_total_ciclo)
        num_paquetes = capacidad_dron * num_ciclos
        paquetes_por_parada.append(num_paquetes)

    return paquetes_por_parada

# Datos de entrada
pedidos_por_parada = [1894, 3900, 1104, 1000, 4834, 1408]
tiempo_parado_por_parada = [4.70, 9.68, 2.74, 2.48, 12, 3.50] # en minutos
capacidad_dron = 5 # paquetes por dron
velocidad_dron_kmh = 40 # km/h
distancia_m = 5 # distancia en metros
tiempo_carga_descarga = 1 # minutos

# Calcular paquetes por parada
paquetes_por_parada = calcular_descarga_autobus(pedidos_por_parada,
tiempo_parado_por_parada, capacidad_dron, velocidad_dron_kmh, distancia_m,
tiempo_carga_descarga)

# Calcular el total de paquetes y el almacenamiento necesario
total_paquetes = sum(paquetes_por_parada)
volumen_paquete_m3 = 0.0045 # m^3 por paquete
almacenamiento_necesario_m3 = total_paquetes * 2 * volumen_paquete_m3

# Imprimir resultados
for i, paquetes in enumerate(paquetes_por_parada):
    print(f"Parada {i+1}: {paquetes} paquetes")

print(f"\nTotal de paquetes descargados: {total_paquetes * 2}")
print(f"Espacio de almacenamiento necesario: {almacenamiento_necesario_m3:.4f} m^3")
```

### CARGA AUTOBÚS

Para calcular el tiempo de carga del autobús, en la parada más próxima al *depot*, se parte de los siguientes datos:

- Total paquetes a cargar: 310 paquetes.
- Capacidad de carga del dron estimada: 5 paquetes.
- Velocidad del dron: 40 km/h.
- Distancia entre el autobús y el depot: 300 metros.
- Tiempo de carga y descarga,  $T_c = 1 \text{ minuto}$ .

Para comenzar, se calcula el número de viajes necesarios con la ecuación [13]:

$$\text{Número de viajes} = \frac{\text{Número de paquetes}}{\text{Capacidad del dron}} \quad [13]$$

Para calcular el tiempo necesario de ida y vuelta se utiliza la ecuación [14]:

$$\text{Tiempo de vuelo ida y vuelta} = \frac{2D}{\text{Velocidad}} \quad [14]$$

Por último, se calcula el tiempo total de carga con la ecuación [15]; calculando previamente el tiempo total por viaje, sumando al tiempo de vuelo de ida y vuelta, el tiempo de carga y descarga del dron:

$$\text{Tiempo total de carga} = \text{Número de viajes} \times \text{Tiempo total por viaje} \quad [15]$$

Para los valores estudiados, se obtiene un tiempo total de carga de 117,80 minutos.

Para que el autobús no esté en la parada más de 12 minutos, se decide trabajar con 10 drones para cargar el autobús.

Con el algoritmo IX se calcula la carga de los paquetes del autobús:

**ALGORITMO IX: Cálculo de la carga de paquetes en el autobús**

```
import math

def tiempo_carga_autobus(num_paquetes, capacidad_dron, velocidad_dron_kmh,
distancia_m, tiempo_carga_descarga, num_drones):
    # Calcular el número de viajes necesarios
    num_viajes = math.ceil(num_paquetes / capacidad_dron)

    # Calcular la velocidad del dron en m/min
    velocidad_dron_mpm = (velocidad_dron_kmh * 1000) / 60

    # Calcular el tiempo de vuelo ida y vuelta en minutos
    tiempo_vuelo_ida_vuelta = (2 * distancia_m) / velocidad_dron_mpm

    # Calcular el tiempo total por viaje
    tiempo_total_por_viaje = tiempo_vuelo_ida_vuelta + tiempo_carga_descarga

    # Calcular el tiempo total de carga con un solo dron
    tiempo_total_carga_un_dron = num_viajes * tiempo_total_por_viaje

    # Calcular el tiempo total de carga con múltiples drones
    tiempo_total_carga_multidron = tiempo_total_carga_un_dron / num_drones

    return tiempo_total_carga_multidron

# Datos de entrada
num_paquetes = 310
capacidad_dron = 5 # paquetes por dron
velocidad_dron_kmh = 40 # km/h
distancia_m = 300 # distancia en metros
tiempo_carga_descarga = 1 # minutos
num_drones = 10

# Calcular el tiempo total de carga
tiempo_total_carga = tiempo_carga_autobus(num_paquetes, capacidad_dron,
velocidad_dron_kmh, distancia_m, tiempo_carga_descarga, num_drones)

print(f"El tiempo total de carga del autobús con {num_drones} drones es de
{tiempo_total_carga:.2f} minutos.")
```

# **CAPÍTULO 5. IMPACTO AMBIENTAL Y**

## **SOSTENIBILIDAD**

El Capítulo 5 analiza el impacto ambiental y la sostenibilidad de la solución propuesta para la entrega de última milla en Valencia. Se evalúan las emisiones generadas, así como la reducción de la huella de carbono.

### **5.1. EMISIONES DE CO<sub>2</sub> Y CONTAMINANTES**

El impacto ambiental de la logística de última milla ha sido un tema de preocupación en los últimos años, debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes generados por los vehículos de entrega tradicionales. Es fundamental adoptar tecnologías sostenibles y optimizar las rutas de entrega para mitigar estos efectos negativos.

Los vehículos de combustión interna utilizados en la logística de última milla son una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos. Estos vehículos, a menudo impulsados por combustibles fósiles, contribuyen a la contaminación del aire y al cambio climático, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas.

Los drones de entrega representan una innovación significativa en la logística de última milla. Al operar en el espacio aéreo, estos dispositivos pueden reducir la congestión del tráfico y las emisiones asociadas con los vehículos de entrega terrestre. Además, la integración de sistemas no tripulados con el transporte público, como se ha propuesto en este estudio aplicado a la ciudad de Valencia, consigue reducir aún más la congestión del tráfico y las emisiones de CO<sub>2</sub>; ya que, se aprovecha la red de transporte público existente sin introducir transporte adicional para realizar las entregas de paquetes.

De esta forma, con la entrega de paquetes empleando autobuses y drones, se consigue aprovechar la infraestructura existente del transporte público y reducir significativamente las emisiones totales. Además, con esta alternativa no solo se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también pueden aliviar la congestión del tráfico (Alverhed, y otros, 2024).



## 5.2. REDUCCIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO

Para realizar la comparación entre el empleo de autobuses junto con drones versus vehículos de entrega tradicionales en términos de reducción de la huella de carbono, se utilizan los siguientes datos estimados:

- Emisiones de vehículos tradicionales de reparto por km: 0,27 kg de CO<sub>2</sub> por km (European Environment Agency (EEA), 2024).
- Distancia cubierta por el vehículo tradicional por día: 100 km por día.
- Número de vehículos tradicionales de reparto: 50 vehículos.
- Emisiones de drones por km: 0,01 kg de CO<sub>2</sub> por km (European Environment Agency (EEA), 2024).
- Distancia promedio cubierta por los drones por día: 40 km por día.
- Número de drones en uso: 57 drones.
- Días de operación por año: 300 días.

### 5.2.1. EMISIONES TOTALES ANUALES

Las emisiones totales de los vehículos de entrega tradicionales se calculan con la ecuación [16]:

$$\begin{aligned} & \textit{Emisiones totales de vehículos tradicionales} \\ &= 0,27 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{km}} \times 100 \frac{\text{km}}{\text{día}} \times 50 \textit{vehículos} \times 300 \frac{\text{días}}{\text{año}} \\ &= 405.000 \textit{ kg de CO}_2 \textit{ por año [16]} \end{aligned}$$

Las emisiones totales de los drones se calculan con la ecuación [17]:

$$\begin{aligned} \textit{Emisiones totales de drones} &= 0,01 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{km}} \times 40 \frac{\text{km}}{\text{día}} \times 57 \textit{drones} \times 300 \frac{\text{días}}{\text{año}} \\ &= 6.840 \textit{ kg de CO}_2 \textit{ por año [17]} \end{aligned}$$

Las emisiones totales de los autobuses no se calculan; ya que, se está aprovechando para la entrega de paquetes un servicio que ya está en funcionamiento en la ciudad, por lo que no supondrá un incremento de emisiones de CO<sub>2</sub>.

De esta manera, se puede calcular el porcentaje de reducción de la huella de carbono con las ecuaciones [18] y [19]:

$$\begin{aligned} \textit{Reducción de emisiones} &= 405.000 \textit{ kg de CO}_2 \textit{ por año} - 6.840 \textit{ kg de CO}_2 \textit{ por año} \\ &= 398.160 \textit{ kg de CO}_2 \textit{ por año [18]} \end{aligned}$$

$$\textit{Porcentaje de reducción} = \left( \frac{398.160 \textit{ kg de CO}_2}{405.000 \textit{ kg de CO}_2} \right) \times 100\% = 98,31\% \textit{ [19]}$$

Así pues, se observa una significativa reducción de la huella de carbono con las mejoras introducidas en el proyecto.

Además, las políticas gubernamentales y las regulaciones ambientales juegan un papel importante en la implementación de prácticas sostenibles en la ciudad. Por ejemplo, la restricción de zonas de bajas emisiones, la promoción de infraestructuras de recarga de vehículos eléctricos y la adopción de tecnologías verdes son algunas medidas que están siendo adoptadas por las autoridades municipales para reducir el impacto ambiental de la logística de última milla.

## **CAPÍTULO 6. ESTUDIO ECONÓMICO**

El Capítulo 6 del TFM se enfoca en el estudio económico del sistema propuesto. Se evalúan los costos de implementación y se realiza un análisis financiero, calculando el flujo de caja neto anual y los indicadores financieros, como el periodo de recuperación de la inversión, el valor actual neto y la tasa interna de retorno.

### **6.1. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN**

La implementación del sistema de entrega de última milla para sistemas no tripulados con el transporte público en la ciudad de Valencia requiere una inversión inicial significativa. Los costos de implementación incluyen la compra de drones, la compra e instalación de *lockers*, la integración con el sistema de transporte público, el desarrollo del *software* y otros costos relacionados. A continuación, se detalla una estimación de los costos iniciales:

- Compra de drones: 285.000 euros (57 drones a un precio estimado de 5000 euros cada uno)
- Compra e instalación de *lockers*: 153.000 euros (96 *lockers* secundarios y 6 *lockers* principales a un precio estimado de 1.500 euros)
- Alquiler y acondicionamiento del *depot* principal: 120.000 euros
- Desarrollo del *software*: 100.000 euros (empresa externa)
- Otros costos (licencias, permisos, formación): 100.000 euros

TOTAL INVERSIÓN INICIAL: 758.000 EUROS

### **6.2. ANÁLISIS FINANCIERO**

El análisis financiero es necesario para determinar la viabilidad económica del proyecto. Se considera un periodo de análisis de 10 años para evaluar el desempeño financiero del proyecto.

#### **6.2.1. INGRESOS ANUALES**

Se estima que el sistema generará ingresos anuales significativos a través de tarifas de entrega cobradas a los usuarios del servicio y posibles subvenciones del gobierno para iniciativas sostenibles. Los ingresos anuales proyectados son:

- Ingresos por tarifas de entrega: 424.200 euros (14.140 pedidos al día con una ganancia de 0,1 euros por pedido)
- Subvenciones y ayudas: 20.000 euros

TOTAL INGRESOS ANUALES: 444.200 EUROS

### 6.2.2. COSTOS OPERATIVOS ANUALES

Los costos anuales incluyen el mantenimiento de drones y *lockers*, costos de *software*, personal de operación y otros costos recurrentes. La estimación de los costos operativos anuales es la siguiente:

- Mantenimiento de drones y *lockers*: 20.000 euros
- Costos de *software* y licencias: 20.000 euros
- Personal de operación: 200.000 euros
- Otros costos: 10.000 euros

TOTAL COSTOS ANUALES: 250.000 EUROS

### 6.2.3. FLUJO DE CAJA NETO ANUAL

El flujo de caja neto anual se calcula restando los costos operativos anuales de los ingresos anuales con la ecuación [20]:

$$\begin{aligned} \text{Flujo de Caja Neto Anual} &= \text{Ingresos Anuales} - \text{Costos Operativos Anuales} \\ &= 444.200\text{€} - 250.000\text{€} = 194.000\text{€} \quad [20] \end{aligned}$$

### 6.2.4. PERÍODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (PRI)

El PRI se calcula dividiendo la inversión inicial entre el flujo de caja neto anual, como se puede observar en la ecuación [21]:

$$PRI = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Flujo de Caja Neto Anual}} = \frac{758.000\text{€}}{194.000\text{€}} = 3,9 \text{ años} \quad [21]$$

El proyecto recuperará la inversión inicial en aproximadamente 4 años.

### 6.2.5. VALOR ACTUAL NETO (VAN)

El VAN se calcula utilizando una tasa de descuento del 10% y un periodo de análisis de 10 años con la ecuación [22]:

$$\begin{aligned} VAN &= - \text{Inversión Inicial} + \sum_{t=1}^{10} \frac{\text{Flujo de Caja Neto Anual}}{(1 + \text{Tasa de Descuento})^t} \\ &= -758.000 + \sum_{t=1}^{10} \frac{194.000}{(1 + 0,10)^t} \approx 434.046\text{€} \quad [22] \end{aligned}$$

El valor positivo del VAN indica que el proyecto es económicamente viable y rentable, proporcionando un retorno significativo sobre la inversión inicial cuando se descuenta a una tasa del 10%.

#### **6.2.6. TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)**

La TIR se determina encontrando la tasa de descuento que hace que el VAN sea cero. En el caso del proyecto se obtiene el siguiente resultado:

$$TIR \approx 22,1\%$$

Las estimaciones financieras realizadas concluyen que el proyecto es viable, recuperando la inversión inicial en aproximadamente 4 años. Además el VAN positivo y una TIR superior a la tasa de descuento del 10%, refuerzan la viabilidad y rentabilidad del proyecto.



# CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

El Capítulo 7 del TFM presenta las conclusiones finales del estudio. Se resumen los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, se mencionan las limitaciones encontradas durante el desarrollo del proyecto y se proponen líneas futuras de investigación para optimizar la integración de drones con el transporte público.

## 7.1. CONCLUSIONES

El presente trabajo se ha centrado en la optimización de la entrega de última milla mediante la integración de drones con el transporte público en la ciudad de Valencia. A lo largo del estudio se han alcanzado los siguientes resultados:

- 1. Infraestructura y ubicación de lockers:** Se realizó un análisis de la infraestructura urbana de Valencia y de las líneas de autobús, lo que permitió identificar ubicaciones estratégicas para instalar **6 lockers principales (de dimensiones 3 m x 3m x 2,5 m)** y **96 lockers secundarios (de dimensiones 2 m x 2 m x 1 m)**, optimizando la distribución de paquetes. La reducción de los tiempos de entrega y la mejora en la precisión de las entregas aumenta la satisfacción del cliente, lo cual es esencial en un mercado altamente competitivo.
- 2. Optimización de rutas y uso de drones:** Se desarrollaron modelos matemáticos para optimizar las rutas de entrega, logrando una reducción en los costos operativos y mejorando la eficiencia del sistema de entrega. Se determinó que serían necesarios **57 drones DJI FlyCart 30**, que tienen una capacidad máxima de **40 kg** y pueden cubrir distancias de hasta **28 km**, garantizando la viabilidad de las entregas en la ciudad.
- 3. Impacto en el tráfico:** La reducción del uso de vehículos tradicionales ha disminuido notablemente la congestión del tráfico en las áreas urbanas, contribuyendo a un entorno más sostenible y mejorando la calidad de vida de los ciudadanos, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible y las políticas ambientales vigentes.
- 4. Reducción de la huella de carbono:** Con la implementación de drones y el uso de autobuses públicos se ha logrado una significativa reducción en las emisiones de gases contaminantes. Se estima una **reducción de la huella de carbono del 98,31%**, pasando de **405.000 kg de CO<sub>2</sub> anuales** a **6.840 kg de CO<sub>2</sub> anuales**.

- 5. Inversión inicial y rentabilidad:** La **inversión inicial** para la implementación del sistema fue de **758.000 euros**, distribuida entre la compra de drones (285.000 euros), *lockers* (153.000 euros), *depot* principal (120.000 euros), desarrollo de software (100.000 euros), y otros costos. El **proyecto recuperará la inversión inicial** en aproximadamente **4 años**, con un **flujo de caja neto anual** de **194.000 euros** y un **valor actual neto** de **434.046 euros**. Por lo tanto, la inversión inicial se recupera a corto plazo, gracias a la mejora en la eficiencia operativa y la reducción de costos asociados al sistema de entrega tradicional.

El presente estudio ha confirmado la viabilidad y efectividad del uso de drones para la entrega de última milla en entornos urbanos, especialmente cuando se integran con las infraestructuras de transporte público existentes. Esta integración no solo permite optimizar las rutas de entrega y reducir los costos operativos, sino que también tiene un impacto positivo en el medio ambiente. La combinación de estos sistemas no tripulados con los autobuses públicos es una solución viable al constante crecimiento del comercio electrónico y la demanda de entregas rápidas.

Otro aspecto a destacar, es la posibilidad de adaptación del trabajo desarrollado. Este sistema es escalable y puede ser implementado en otras ciudades con características similares, proporcionando una solución flexible para mejorar la logística urbana en diversos contextos. La capacidad de ajustar el modelo a diferentes estructuras y demandas urbanas demuestra su versatilidad y potencial de expansión.

## 7.2. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

El estudio presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas. La implementación del sistema propuesto está condicionada por las regulaciones locales e internacionales sobre el uso de drones y la logística urbana. Las normativas pueden variar significativamente entre diferentes regiones y países, lo cual podría afectar la viabilidad del proyecto si no se adaptan adecuadamente.

Asimismo, la implementación del sistema requiere acuerdos y colaboraciones con las entidades de transporte público de las ciudades y los supermercados donde se colocarán los *lockers* secundarios. Estos acuerdos pueden ser complejos y llevar tiempo, ya que implican la coordinación entre diferentes partes interesadas con objetivos y prioridades distintos. La falta de estos acuerdos puede retrasar la implementación del sistema y limitar su efectividad.

Además, la efectividad del sistema depende en gran medida del desarrollo y disponibilidad de tecnologías avanzadas, como drones de alta capacidad y sistemas de gestión de rutas en tiempo real. Estas tecnologías, aunque prometedoras, aún están en evolución y pueden enfrentar desafíos técnicos y económicos.

Otra limitación es el costo inicial de implementación. Aunque los beneficios a largo plazo son claros, la inversión inicial en infraestructura y drones puede ser una barrera significativa para algunas ciudades o empresas, especialmente aquellas con recursos limitados. La financiación y el apoyo gubernamental serán necesarios para poder desarrollar este tipo de proyectos.

### 7.3. FUTURO DE LA ENTREGA DE ÚLTIMA MILLA INTELIGENTE

El futuro de la entrega de última milla inteligente está marcado por la combinación de tecnologías emergentes y enfoques sostenibles. Por ejemplo, una tendencia clara es la mayor automatización de los procesos logísticos. La integración de vehículos autónomos y drones más avanzados permitirá automatizar aún más el proceso de entrega, reduciendo la necesidad de intervención humana y aumentando la eficiencia. Estos avances tecnológicos facilitarán entregas más rápidas y precisas, adaptándose mejor a las demandas cambiantes de los consumidores.

El uso de la inteligencia artificial y el *big data* para la gestión de rutas y la optimización logística será cada vez más común. Estas tecnologías permitirán una gestión dinámica y en tiempo real de las rutas de entrega, adaptándose a las condiciones de tráfico, la demanda y otros factores externos. La capacidad de predecir y responder a estas variables mejorará significativamente la eficiencia y la fiabilidad del sistema de entrega.

Además, el enfoque en la sostenibilidad continuará siendo una prioridad. Las políticas y regulaciones seguirán incentivando prácticas sostenibles, promoviendo el uso de vehículos eléctricos y soluciones verdes para la entrega de última milla. La integración de estos enfoques sostenibles no solo beneficiará al medio ambiente, sino que también contribuirá a la aceptación pública y la viabilidad a largo plazo de estos sistemas innovadores.

Considerando aspectos más concretos estudiados en el trabajo, un área interesante para el futuro es la capacidad de repartir paquetes de mayor tamaño. Actualmente, los drones se utilizan principalmente para la entrega de paquetes pequeños y ligeros, pero con el avance de la tecnología y la mejora en la capacidad de carga de los drones, será posible transportar paquetes más grandes. Esto ampliará significativamente el alcance y la utilidad de los sistemas de entrega de drones.

Se podrá estudiar la posibilidad de minimizar el tiempo en vez del número de drones; ya que se trabaja con un elevado volumen de paquetes; por lo que, la utilización de un mayor número de drones se amortizará en un plazo de tiempo razonable. También se podrá trabajar en la introducción de más líneas de autobús en el sistema y la posibilidad de enlazar unas con otras para obtener mejores resultados en cuanto a tiempos.

Otro aspecto importante a considerar es la gestión de devoluciones. La implementación de *lockers* permitirá no solo la entrega de paquetes, sino también la devolución de aquellos que no hayan sido recogidos o que los clientes deseen devolver. Esto mejorará la eficiencia y la conveniencia del sistema, ofreciendo una solución completa para la logística de última milla.

Finalmente, será necesario trabajar en temas de seguridad, como la protección de los paquetes y de los drones durante el transporte y en los *lockers*, así como la protección de los datos de los clientes. Otro estudio futuro corresponde con la carga y almacenamiento de baterías. Desarrollando tecnologías de seguridad avanzada se conseguirá ganar la confianza de los consumidores y la integridad del sistema.



Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

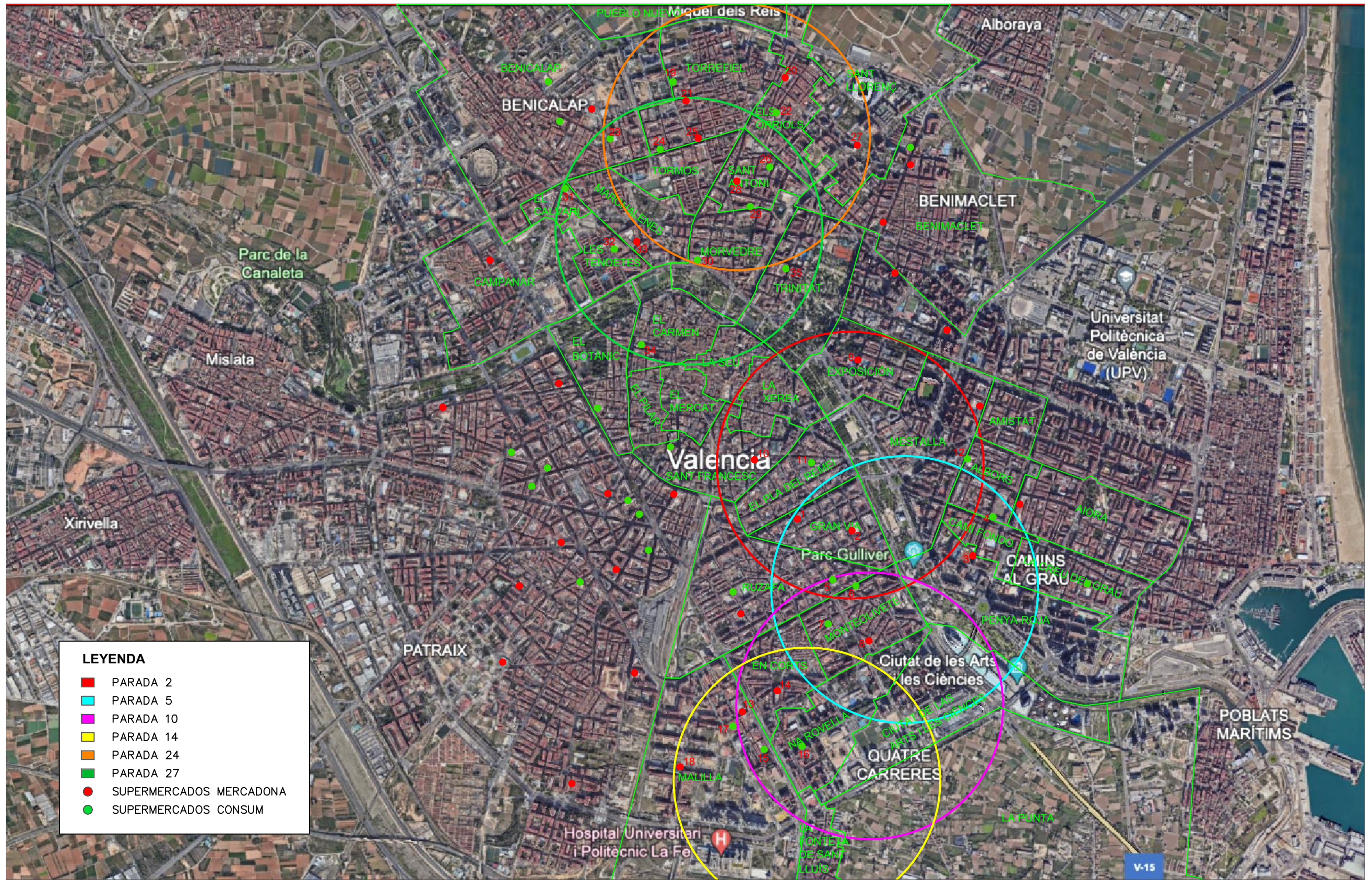
---

En conclusión, la optimización del sistema de entrega de última milla mediante el uso de drones y su integración con el transporte público ofrece una solución viable y eficiente para enfrentar los desafíos logísticos de las ciudades modernas, aunque no se deben dejar de lado las tendencias futuras para adaptarse al cambio continuo. Esta estrategia no solo mejora la eficiencia operativa y reduce los costos, sino que también contribuye a la creación de ciudades más sostenibles, alineándose con las tendencias globales hacia un desarrollo urbano más inteligente y ecológico.

# ANEXOS

## 8.1. PLANO VALENCIA









# BIBLIOGRAFÍA

- Ajuntament de València.* (2023). Obtenido de Oficina de Estadística:  
[https://www.valencia.es/es/cas/estadistica/mapa-barrios?p\\_p\\_id=EstadisticaPorMapasdebarrios\\_INSTANCE\\_c7PdzXNn6OBA&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&\\_EstadisticaPorMapasdebarrios\\_INSTANCE\\_c7PdzXNn6OBA\\_codigo=Barrio10N&\\_EstadisticaPorMapasdebarrios\\_INSTANCE\\_c7PdzXNn6OBA\\_codigo=Barrio10N](https://www.valencia.es/es/cas/estadistica/mapa-barrios?p_p_id=EstadisticaPorMapasdebarrios_INSTANCE_c7PdzXNn6OBA&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&_EstadisticaPorMapasdebarrios_INSTANCE_c7PdzXNn6OBA_codigo=Barrio10N&_EstadisticaPorMapasdebarrios_INSTANCE_c7PdzXNn6OBA_codigo=Barrio10N)
- Ajuntament de València.* (2024). Obtenido de Verde València:  
<https://www.valencia.es/web/cve>
- Ajuntament de València.* (2024). Obtenido de Guía Urbana por barrios de Valencia:  
<https://www.valencia.es/cas/urbanismo/inicio>
- Alverhed, E., Hellgren, S., Isaksson, H., Olsson, L., Palmqvist, H., & Floden, J. (2024). *Autonomous last-mile delivery robots: a literature review*. European Transport Research Review.
- Chase, R., Jacobs, F., & Aquilano, N. (2009). *Administración de Operaciones: Producción y Cadena de Suministro*. México: Mc Graw Hill.
- Chen, K.-W., Xie, M.-R., Chen, Y.-M., Chu, T.-T., & Lin, Y.-B. (2022). *DronTalk: An Internet-of-Things-Based Drone System for Last-Mile Drone Delivery*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- Company's, R., & Corominas, A. (1993). *Organización de la producción I. Diseño de sistemas productivos I*. Barcelona: Edicions UPC.
- Deng, T., Xu, X., Zou, Z., Liu, W., Wang, D., & Hu, M. (2023). Multi-Drone Parcel Delivery via Public Vehicles: A Joint Optimization Approach. China.
- DJI.* (Julio de 2024). Obtenido de DJI FLYCART 30: <https://www.dji.com/es/flycart-30>
- Engesser, V., Rombaut, E., Vanhaverbeke, L., & Lebeau, P. (2023). *Autonomous Delivery Solutions for Last-Mile Logistics Operations: A Literature Review and Research Agenda*. Basel, Switzerland: Sustainability.
- European Commission.* (11 de Julio de 2023). Obtenido de [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_3718](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_3718)

Diseño de redes y asignación de rutas de entrega de última milla para sistemas no tripulados integrados con el transporte público. Aplicación a la ciudad de Valencia.

---

*European Environment Agency (EEA)*. (2024). Obtenido de [https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications?size=n\\_10\\_n&filters%5B0%5D%5Bfield%5D=cluster\\_name&filters%5B0%5D%5Btype%5D=any&filters%5B0%5D%5Bvalues%5D%5B0%5D=eea&filters%5B1%5D%5Bfield%5D=objectProvides&filters%5B1%5D%5Btype%5D=any&filters%5B1%5D%5](https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications?size=n_10_n&filters%5B0%5D%5Bfield%5D=cluster_name&filters%5B0%5D%5Btype%5D=any&filters%5B0%5D%5Bvalues%5D%5B0%5D=eea&filters%5B1%5D%5Bfield%5D=objectProvides&filters%5B1%5D%5Btype%5D=any&filters%5B1%5D%5)

*European Union Aviation Safety (EASA)*. (2024). Obtenido de <https://www.easa.europa.eu/en/regulations>

Gisbert, R. S. (2 de Octubre de 2019). *Youtube*. Obtenido de Universtat Politècnica de València: <https://www.youtube.com/watch?v=U2977zCL6Zo>

*Google Maps*. (2024). Obtenido de <https://www.google.es/maps/@38.0239872,-1.1665408,14z?hl=es&entry=ttu>

*Instituto Nacional de Estadística (INE)*. (2024). Obtenido de <https://www.ine.es>

Lázaro, I. (27 de Enero de 2024). *Inspenet*. Obtenido de <https://inspenet.com/noticias/wing-google-presento-nuevo-dron-de-reparto/>

Lemardele, C., Baldo, A., Aniculaesei, A., Rausch, A., Conill, M., Everding, L., . . . Tohati, I. (2023). *The LogiSmile Project - Piloting Autonomous Vehicles for Last-Mile Logistics in European cities*. Barcelona: ELSEVIER.

*Levante: El Mercantil Valenciano*. (25 de Abril de 2024). Obtenido de Especial Comercio Local: <https://www.levante-emv.com/horta/2024/04/25/manises-instala-lockers-facilitar-recogida-101500694.html>

Li, Y., Diaz, M., Morantes, S., & Dorati, Y. (2018). *Vehículos Autónomos: Innovación en la Logística Urbana*. Panamá.

*Logistics&Automation*. (2024). Obtenido de <https://www.logisticsautomationmadrid.com/es/2024/04/02/prime-air-amazon-se-lanza-a-las-entregas-con-drones-mas-ligeros-y-rapidos/>

Lu, X. (2023). *Uso de los vehículos autónomos para las entregas de última milla. Casos de Estudios: JD.COM y ALIBABA*. Valencia, España.

Mohammad Imran, N., Mishra, S., & Won, M. (2023). *A-VRPD: Automating Drone-Based Last-Mile Delivery Using Self-Driving Cars*. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.

*Moovit*. (2024). Obtenido de [https://moovitapp.com/index/es/transporte\\_público-line-13-Valencia-1669-775042-219690-0](https://moovitapp.com/index/es/transporte_público-line-13-Valencia-1669-775042-219690-0)

*Moovit: Línea 13 de autobús*. (2024). Obtenido de <https://appassets.mvtdev.com/map/149/l/1669/219690.pdf>

- Moovit: Línea 6 de autobús.* (2024). Obtenido de <https://appassets.mvtdev.com/map/149/l/1669/219683.pdf>
- Naciones Unidas.* (2015). Obtenido de Objetivos de Desarrollo Sostenible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Rubrichi, L., Grazia Gnoni, M., & Tornese, F. (2023). Simulation modelling for integrating economic and environmental performance assesment for autonomous delivery systems in last mile logistics. Italy.
- Sabater, J. P. (7 de Marzo de 2014). *Youtube.* Obtenido de Universitat Politècnica de València: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=D4W8CkEch4g>
- Schnieder, M., Hinde, C., & West, A. (2022). Land Efficient Mobility: Evaluation of Autonomous Last Mile Delivery Concepts in London. UK.
- Tadic, S., Veljovic, M., Krstic, M., & Zecevic, S. (2023). Application of Industry 4.0 Technologies in Home Delivery: a Review. Serbia.
- Valenciaplaza.* (2022). Obtenido de <https://valenciaplaza.com/quatre-carreres-el-distrito-mas-poblado-de-valencia-y-ciutat-vella-el-que-gano-mas-poblacion>
- Visitvalencia.* (2024). Obtenido de Valencia: Moverse por Valencia: <https://www.visitvalencia.com/planifica-tu-viaje-a-valencia/como-moverse>