

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile – Infrastrutture di Trasporto

PROGETTO DI UNA STAZIONE DI DECOLLO E ATTERRAGGIO DI DRONI PER IL TRASPORTO DEI COLLI NELL'ULTIMO MIGLIO

Relatore: Prof. Ing. Roberto Maja

Tesi di Laurea di
Federico Gazzetta
Matricola 103480

Anno Accademico 2025–2026

INDICE

1. ABSTRACT	4
2. INTRODUZIONE	6
3. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA	8
3.1 Definizione dell'ultimo miglio	8
3.2 Crescita dell'e-commerce e domanda urbana.....	10
3.3 Criticità del trasporto merci nell'ultimo miglio	13
3.4 Soluzioni attuali per la distribuzione urbana	16
3.5 Integrazione dei droni nei sistemi logistici	19
3.6 Evoluzione prevista nel medio-lungo periodo	21
4. STATO DELL'ARTE	24
4.1 Progetti e casi studio	24
4.2 Tipologie di droni e aspetti manutentivi	26
4.3 Software di gestione del volo e ottimizzazione operativa	29
4.4 Tipologie di merci trasportabili	34
4.5 Normativa vigente e sicurezza del volo	37
5. SVILUPPO DEL LAVORO	41
5.1 Definizione della soluzione infrastrutturale	41
5.2 Microzona urbana e modello di domanda	45
5.3 Applicazione del modello alla città di Roma	55
5.4 Progettazione tecnica e standardizzazione della stazione	67
5.5 Verifica di fattibilità strutturale	78
6. CONCLUSIONI	90
7. BIBLIOGRAFIA	95

1. ABSTRACT

In questo lavoro di tesi propongo un'ipotesi di progettazione di una piattaforma di decollo e atterraggio per droni dedicata alla consegna di colli nell'ultimo miglio. L'obiettivo che mi sono posto è sviluppare una soluzione che possa essere integrata all'interno del tessuto urbano esistente, supportando, migliorando e implementando un ipotetico servizio di consegna con droni. La ricerca nasce dall'esigenza di rispondere alle criticità legate alla crescita dell'e-commerce e all'aumento della domanda di consegne rapide, sostenibili ed efficienti, in un contesto in cui i metodi tradizionali di distribuzione presentano limiti significativi in termini di costi, impatto ambientale e congestione del traffico.

Il percorso di analisi ha preso avvio da un'osservazione del contesto logistico attuale e delle sue problematiche, per poi approfondire le potenzialità offerte dall'uso dei droni come strumento per innovare la catena di consegna urbana. Ho esplorato le sfide tecniche e normative legate a questo tipo di soluzione, concentrandomi su aspetti fondamentali come l'autonomia di volo, il carico utile trasportabile, le distanze raggiungibili e le esigenze infrastrutturali, elementi indispensabili per valutare l'efficacia di un servizio di consegna con droni.

Il cuore del lavoro si focalizza sulla progettazione di una piattaforma urbana di decollo e atterraggio, pensata come nodo integrato in un sistema logistico più ampio, in grado di rispondere alle specificità di un ambiente urbano complesso. Questo modello preliminare, supportato da uno scenario d'uso ipotetico, intende offrire una visione concreta di come i droni potrebbero operare in un servizio reale di consegna nell'ultimo miglio.

Il lavoro rappresenta, dunque, un primo passo verso la definizione di un sistema innovativo per la logistica urbana, capace di coniugare efficienza operativa e sostenibilità ambientale. Le considerazioni emerse aprono nuove prospettive per lo sviluppo del settore e offrono spunti per ulteriori ricerche e approfondimenti.

ABSTRACT

In this thesis, I develop a conceptual design for a drone take-off and landing platform intended to support last-mile parcel delivery operations. The primary objective is to propose a solution that can be effectively integrated into the existing urban fabric, thereby enhancing and facilitating the implementation of a drone-based delivery service. This research originates from the need to address the critical challenges associated with the rapid growth of e-commerce and the increasing demand for fast, sustainable, and efficient delivery systems, in a context where conventional distribution models exhibit significant limitations in terms of operational costs, environmental impact, and urban traffic congestion.

The study begins with an analysis of the current logistics framework and its inherent constraints, followed by an examination of the opportunities offered by unmanned aerial vehicles (UAVs) as an innovative tool for transforming urban last-mile distribution. Particular attention is devoted to the technical and regulatory aspects of drone deployment, with specific reference to flight autonomy, payload capacity, operational range, and infrastructural requirements, all of which are essential parameters in evaluating the feasibility and effectiveness of such services.

The core contribution of this research lies in the design of an urban take-off and landing platform conceived as a functional node within a broader integrated logistics network. The proposed model is structured to address the operational and spatial complexities of dense urban environments. A hypothetical use-case scenario is developed to provide a practical framework through which the platform's potential performance and integration within existing logistics systems can be assessed.

This work represents an initial step toward the conceptualization of an innovative urban logistics infrastructure capable of reconciling operational efficiency with environmental sustainability. The results highlight both the opportunities and the challenges associated with drone-based delivery systems and establish a foundation for further research and future technological and regulatory developments in the sector.

2. INTRODUZIONE

L'obiettivo principale di questa tesi è definire e analizzare una soluzione progettuale innovativa: una **piattaforma standardizzata** per droni dedicata alla consegna nell'ultimo miglio, in grado di fungere da base multifunzionale per operazioni logistiche e tecniche. La piattaforma è concepita per essere installata **sui tetti degli edifici urbani e dei siti logistici (magazzini)**, dove svolge una funzione centrale nel sistema: permette ai droni di **caricare e scaricare i pacchi**, ricaricarsi, eseguire operazioni di diagnostica e gestire piccole problematiche software. Il sistema prevede anche un **meccanismo di trasporto interno tramite rulli**, in grado di spostare i colli ricevuti dalla piattaforma ai piani inferiori o alle aree di smistamento dell'edificio, come un vero e proprio hub urbano automatizzato.

La piattaforma rappresenta quindi **un nodo intermedio strategico**, una sorta di “porto urbano” per i droni, in grado di integrare i flussi logistici esistenti e ottimizzare le operazioni di consegna sia verso i magazzini locali sia verso i clienti finali.

Nello sviluppare questa idea, mi sono posto alcune domande fondamentali che hanno guidato l'intero lavoro:

- Come posso progettare una piattaforma che sia **standardizzata**, scalabile e adattabile a diversi contesti urbani?
- Che tipo di utente prendo in considerazione e quali sono le sue esigenze specifiche?
- Che tipologia di merci viene movimentata e quali caratteristiche tecniche deve avere il sistema per gestirle in sicurezza?
- Quali sono i **vincoli tecnici**, in termini di autonomia di volo, carico utile, affidabilità e sicurezza, da considerare per la progettazione?
- Quali limiti e opportunità derivano dalle **normative vigenti** (nazionali e internazionali) sull'uso dei droni per consegne?
- In che modo la piattaforma può integrarsi con i flussi logistici esistenti, sia orizzontali (tra magazzini) che verticali (verso il cliente finale)?
- Quali vantaggi può apportare questo sistema rispetto alle modalità di consegna tradizionali in termini di efficienza, sostenibilità e riduzione del traffico urbano?
- Quali sono le possibili prospettive di sviluppo e gli scenari futuri per un'infrastruttura logistica urbana basata sui droni?

Il punto di partenza di questa ricerca è stato l'osservazione di un contesto in rapido cambiamento: la crescente diffusione dell'e-commerce e l'aumento della domanda di consegne rapide e sostenibili stanno mettendo a dura prova i tradizionali sistemi di trasporto merci, generando problemi di congestione, aumento dei costi e impatto ambientale. Di fronte a queste sfide, ho sentito la necessità di esplorare soluzioni alternative per la logistica urbana. L'utilizzo dei droni per la consegna dell'ultimo miglio mi è sembrato fin da subito una tecnologia innovativa e promettente, capace di ridurre i tempi di consegna, limitare l'impatto ambientale e alleggerire il traffico nelle aree urbane più congestionate. Questa tesi non si limita a un'analisi teorica: il mio intento è stato quello di sviluppare un modello preliminare di piattaforma di decollo e atterraggio per droni, concepito per essere integrato in un sistema logistico più ampio e rispondere in modo concreto alle esigenze operative di un servizio di consegna efficiente e sostenibile. Il valore aggiunto di questo lavoro risiede proprio nell'approccio pratico e nella volontà di tradurre le idee in soluzioni progettuali realizzabili, contribuendo al dibattito su una tecnologia emergente e al suo potenziale impatto sul futuro della logistica urbana.

Il percorso che propongo si articola come segue:

- Il **Capitolo 3** inquadra il problema, analizzando le sfide e le criticità legate alla consegna dell'ultimo miglio e le potenzialità offerte dai droni, con uno sguardo alle tendenze future.
- Il **Capitolo 4** presenta lo stato dell'arte, esaminando la normativa vigente, i principali progetti esistenti, le tipologie di droni e merci trasportabili, e i software di gestione.
- Il **Capitolo 5** illustra lo sviluppo del lavoro, con la progettazione dell'infrastruttura e della piattaforma, l'analisi delle criticità, il layout, le considerazioni tecniche e uno scenario applicativo.
- Il **Capitolo 6** propone le conclusioni, sintetizzando i risultati ottenuti, discutendo i limiti dello studio e offrendo spunti per futuri approfondimenti.

3. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

3.1 Definizione dell'ultimo miglio

Nel contesto della logistica e dei trasporti, il termine *ultimo miglio* (*last mile*) identifica la fase finale del processo distributivo, corrispondente al tratto conclusivo del percorso di consegna delle merci che si estende dal centro di distribuzione – quale un magazzino, un hub urbano o un punto di consolidamento – fino al destinatario finale (Gevaers et al., 2011). Quest'ultimo può essere rappresentato sia da un utente privato (ambito B2C), sia da un esercizio commerciale o produttivo (ambito B2B di prossimità) (Taniguchi et al., 2001).

All'interno della supply chain, l'ultimo miglio è unanimemente riconosciuto come la fase più critica sotto il profilo operativo, economico e ambientale, in particolare nei contesti urbani e metropolitani ad elevata densità insediativa e caratterizzati da forti livelli di congestione del traffico (Dablanc, 2007; OECD, 2015). In tale segmento convergono infatti le maggiori complessità organizzative, legate alla necessità di garantire elevati standard di servizio in condizioni spaziali e temporali fortemente vincolate (Savelsbergh e Van Woensel, 2016).

Questa porzione della catena logistica si distingue innanzitutto per un elevato grado di frammentazione delle consegne, dovuto alla prevalenza di colli di piccole e medie dimensioni destinati a una molteplicità di destinatari distribuiti capillarmente sul territorio urbano (McKinnon et al., 2015). A ciò si aggiungono le crescenti richieste di puntualità, affidabilità e flessibilità da parte degli utenti finali, che si traducono in finestre temporali ristrette, possibilità di consegna personalizzata e necessità di tracciabilità in tempo reale (Boyer et al., 2009).

Dal punto di vista urbano e territoriale, l'ultimo miglio genera inoltre impatti rilevanti in termini ambientali e sociali, contribuendo all'aumento delle emissioni climalteranti e degli inquinanti locali, alla congestione della rete stradale e all'occupazione dello spazio pubblico per le operazioni di carico e scarico (Allen et al., 2012; Browne et al., 2012). Tali criticità risultano ulteriormente accentuate dalla rapida espansione dell'e-commerce, che ha determinato un incremento significativo del numero di consegne domiciliari, spesso caratterizzate da bassi volumi unitari e da elevata frequenza (Visser et al., 2014).

Il processo dell'ultimo miglio coinvolge una pluralità di entità, riconducibili a tre macro-categorie principali.

La prima è costituita dalle persone: i destinatari finali, siano essi utenti privati o operatori

commerciali, gli operatori logistici impegnati nelle attività di trasporto e distribuzione, nonché gli attori pubblici e istituzionali responsabili della regolazione della mobilità urbana e dell'uso dello spazio stradale (Taniguchi et al., 2001; Dablanc, 2007). La seconda categoria riguarda i mezzi di trasporto impiegati, che spaziano dai veicoli commerciali leggeri tradizionali a soluzioni più sostenibili quali veicoli elettrici, cargo-bike ed e-bike, fino a sistemi innovativi e sperimentali basati su logiche multimodali o automatizzate (OECD, 2015; Browne et al., 2012). La terza categoria comprende infine le merci e le infrastrutture di supporto, come i centri di consolidamento urbano, i micro-depositi locali, i punti di ritiro automatizzati e le piattaforme logistiche di prossimità (Allen et al., 2012).

Dal punto di vista economico, l'ultimo miglio presenta un'elevata incidenza sui costi complessivi della distribuzione, che in ambito urbano può arrivare a rappresentare fino a circa la metà del costo totale del processo logistico (Capgemini Research Institute, 2019). Tale incidenza è fortemente influenzata dalla variabilità delle condizioni operative, legate al traffico, alle regolamentazioni locali (ad esempio zone a traffico limitato e restrizioni orarie), nonché alla disponibilità di spazi per la sosta e le operazioni di consegna (World Economic Forum, 2020). In questo scenario, l'innovazione tecnologica e la digitalizzazione assumono un ruolo centrale, attraverso l'impiego di sistemi di ottimizzazione dei percorsi, piattaforme di gestione dei flussi logistici e strumenti di monitoraggio in tempo reale delle consegne (Crainic e Montreuil, 2016).

In sintesi, l'ultimo miglio rappresenta il nodo più delicato e dinamico della logistica urbana, in cui si intrecciano esigenze di efficienza economica, qualità del servizio e sostenibilità ambientale (OECD, 2015). È in questa fase che si concentra gran parte del valore percepito dal cliente finale e, al contempo, una quota rilevante delle criticità che le città contemporanee sono chiamate ad affrontare in un'ottica di pianificazione integrata dei trasporti e dello spazio urbano (Taniguchi et al., 2001).

In questo quadro generale, l'ultimo miglio non può essere analizzato come un fenomeno isolato, ma va interpretato come il risultato di trasformazioni strutturali più ampie che stanno interessando i sistemi di produzione, distribuzione e consumo. Tra queste, un ruolo centrale è svolto dalla rapida e continua espansione dell'e-commerce, che ha modificato in modo sostanziale la domanda di trasporto merci in ambito urbano, sia in termini quantitativi sia qualitativi (Visser et al., 2014; Savelsbergh e Van Woensel, 2016). L'aumento delle vendite online, la crescente aspettativa di consegne rapide e personalizzate e la diffusione di modelli distributivi sempre più orientati al B2C hanno infatti intensificato la pressione sull'ultimo miglio, amplificandone complessità operative e impatti

territoriali. Alla luce di ciò, il capitolo successivo analizza la crescita dell'e-commerce e il conseguente incremento delle consegne urbane, evidenziando il legame diretto tra l'evoluzione dei modelli di consumo e le nuove sfide della logistica dell'ultimo miglio.

3.2 Crescita dell'e-commerce e aumento delle consegne nell'ultimo miglio

La crescita dell'e-commerce costituisce uno dei principali fattori di trasformazione dei sistemi logistici contemporanei e rappresenta un elemento chiave per comprendere l'evoluzione e la crescente complessità della logistica dell'ultimo miglio (Mangiaracina et al., 2016; Gevaers et al., 2014). Con il termine e-commerce si fa riferimento all'insieme delle transazioni commerciali che avvengono attraverso piattaforme digitali, nelle quali il processo di acquisto è separato fisicamente dal momento della consegna del bene, demandata a una rete logistica dedicata (Cho et al., 2008; Ramanathan, 2010). Tale separazione determina un profondo mutamento nei flussi di trasporto delle merci, trasferendo integralmente sull'operatore logistico l'onere della distribuzione finale verso il consumatore.

Negli ultimi anni, la diffusione dell'e-commerce ha conosciuto una crescita significativa, sostenuta dall'evoluzione tecnologica, dalla capillare diffusione di Internet e dei dispositivi mobili, nonché dal cambiamento delle abitudini di consumo (UNCTAD, 2020; OECD, 2021). Questo fenomeno è stato ulteriormente accelerato nel periodo pandemico, che ha consolidato l'acquisto online come modalità ordinaria anche per beni di largo consumo (McKinsey, 2020; Dablanc et al., 2021). Di conseguenza, il modello distributivo tradizionale, basato su consegne consolidate verso punti vendita fisici, è stato progressivamente sostituito da un modello orientato alla consegna diretta al consumatore finale, tipicamente riconducibile al segmento Business-to-Consumer (Browne et al., 2012; Visser et al., 2014).

Dal punto di vista logistico, tale trasformazione si traduce in un aumento significativo del numero di spedizioni, accompagnato da una riduzione della dimensione media degli ordini e da una maggiore dispersione geografica delle destinazioni finali (Allen et al., 2018; Savelsbergh & Van Woensel, 2016). Ogni ordine e-commerce genera, di fatto, una singola richiesta di consegna, spesso caratterizzata da vincoli temporali stringenti e da aspettative elevate in termini di affidabilità e rapidità del servizio (Marcucci et al., 2017). Questo assetto comporta una crescente pressione sui sistemi di distribuzione urbana, rendendo la fase dell'ultimo miglio sempre più centrale all'interno della supply chain.

L'ultimo miglio rappresenta infatti la porzione finale del processo logistico e coincide con il tratto in cui le merci vengono recapitate al destinatario finale, generalmente all'interno di contesti urbani complessi (Gevaers et al., 2011; Taniguchi et al., 2016). La crescita dell'e-commerce ha amplificato le criticità intrinseche di questa fase, aumentando il numero di veicoli impegnati nelle consegne e la frequenza delle fermate, spesso in spazi caratterizzati da elevata congestione e limitata disponibilità di aree di carico e scarico (Dablanc, 2009; Nuzzolo et al., 2015). Ne deriva una progressiva perdita di efficienza operativa, che si riflette sia sull'organizzazione dei trasporti sia sull'impatto complessivo del sistema logistico sulla città.

Dal punto di vista operativo, la distribuzione e-commerce nell'ultimo miglio si basa prevalentemente sull'impiego di veicoli commerciali leggeri, come furgoni di piccola e media dimensione, scelti per la loro versatilità e capacità di operare in ambito urbano (Allen et al., 2017; Crainic et al., 2009). In aree centrali o soggette a restrizioni di accesso, tali mezzi sono progressivamente affiancati da soluzioni alternative, quali biciclette e cargo bike, spesso a pedalata assistita, e da veicoli elettrici, con l'obiettivo di migliorare la sostenibilità ambientale delle operazioni di consegna (Lebeau et al., 2016; Melo & Baptista, 2017). Tuttavia, l'eterogeneità dei mezzi impiegati e la frammentazione delle spedizioni rendono complessa l'ottimizzazione dei percorsi e delle risorse disponibili.

Parallelamente, la crescita dell'e-commerce ha determinato un ampliamento del numero di lavoratori coinvolti quotidianamente nelle attività di ultimo miglio. Oltre agli autisti e ai corrieri addetti alle consegne, spesso sottoposti a elevati carichi di lavoro e a vincoli temporali stringenti, operano figure professionali dedicate alla pianificazione e al coordinamento logistico, responsabili dell'organizzazione dei giri di consegna, dell'allocazione dei mezzi e della gestione delle priorità (Perboli et al., 2021). A questi si affiancano gli addetti ai magazzini urbani e ai centri di smistamento, che svolgono attività di preparazione degli ordini, consolidamento delle spedizioni e gestione dei resi, contribuendo in modo determinante all'efficienza complessiva del sistema (Mangiaracina et al., 2015).

Negli ultimi anni si è inoltre diffusa l'adozione di modelli organizzativi flessibili, basati sull'impiego di lavoratori autonomi o occasionali coordinati tramite piattaforme digitali, spesso riconducibili ai paradigmi della sharing e gig economy (Carbone et al., 2017; Rougès & Montreuil, 2014). Tali modelli consentono di rispondere rapidamente alle variazioni della domanda, ma introducono ulteriori elementi di complessità nella gestione operativa e pongono nuove questioni legate alla sostenibilità economica e sociale delle attività di consegna (Cagliano & Baruzzi, 2022).

L'intensità delle consegne dell'ultimo miglio nelle principali città italiane evidenzia la dimensione strutturale del fenomeno. Secondo recenti elaborazioni su dati di logistica urbana, nelle grandi aree metropolitane italiane si registrano mediamente tra i 300 e i 350 viaggi di consegna al giorno ogni 1.000 abitanti (Clean Cities Campaign, 2024). In particolare, Milano presenta il valore più elevato, con circa 350 viaggi giornalieri per 1.000 abitanti, seguita da Torino con 320, Bologna con 310, mentre Roma e Firenze si attestano intorno ai 300 viaggi per 1.000 abitanti.

Tali valori confermano come la distribuzione urbana delle merci rappresenti una componente significativa della mobilità complessiva nelle città italiane. Considerando una città come Roma, con una popolazione superiore ai 2,8 milioni di abitanti, il dato implica diverse centinaia di migliaia di movimenti di consegna al giorno, con un impatto diretto sulla congestione stradale, sull'occupazione delle aree di carico e scarico e sull'organizzazione complessiva dello spazio urbano. Analogamente, nel caso di Milano, l'elevata densità commerciale e la forte penetrazione dell'e-commerce contribuiscono ad accentuare ulteriormente la pressione sul sistema viario.

Nel complesso, la crescita dell'e-commerce ha reso evidente come la logistica dell'ultimo miglio non possa più essere considerata una semplice fase terminale del processo distributivo, ma rappresenti un elemento strutturale di interazione tra sistema dei trasporti, organizzazione urbana e qualità della vita dei cittadini (Crainic et al., 2018). L'aumento delle consegne a domicilio, la frammentazione dei flussi e l'intensificazione delle attività di distribuzione nei centri urbani pongono infatti sfide rilevanti in termini di efficienza, impatto ambientale e utilizzo dello spazio pubblico.

Alla luce di queste considerazioni, risulta necessario analizzare in modo approfondito le principali criticità associate alle consegne dell'ultimo miglio, con particolare riferimento all'aumento dei costi operativi, agli effetti sulla sostenibilità ambientale e alla crescente congestione urbana (Dablanc et al., 2017; Nuzzolo et al., 2015). Tali aspetti costituiscono il fulcro del capitolo successivo, nel quale verranno esaminati i problemi attuali che caratterizzano la distribuzione delle merci in ambito urbano e che rendono l'ultimo miglio uno dei nodi più complessi e rilevanti della logistica contemporanea.

3.3 Criticità e problemi attuali del trasporto merci nell'ultimo miglio

La distribuzione urbana delle merci nell'ultimo miglio rappresenta oggi uno dei segmenti più critici dell'intero sistema logistico, sia dal punto di vista economico sia sotto il profilo ambientale, territoriale e sociale. Sebbene l'ultimo miglio copra generalmente meno del 5% della distanza complessiva lungo la supply chain, esso può arrivare a rappresentare fino al **30–50% del costo totale di consegna** nel modello B2C, a causa dell'elevata incidenza dei tempi di fermata, della frammentazione degli ordini e della ridotta densità di consegna (Gevaers et al., 2014).

In ambito europeo, il trasporto merci urbano rappresenta mediamente **10–15% dei veicoli-km percorsi nelle città**, ma può contribuire fino al **25% delle emissioni di CO₂ da traffico urbano** e a una quota compresa tra **30% e 50% delle emissioni locali di NO_x e PM** (OECD/ITF, 2019).

Nel contesto italiano, il trasporto merci su strada rappresenta oltre **l'85% del trasporto interno di merci** (Eurostat, 2023), con una quota crescente attribuibile alle consegne urbane legate all'e-commerce.

Nel caso di **Roma**, studi condotti nell'ambito della pianificazione della mobilità urbana indicano che i veicoli commerciali leggeri rappresentano circa **il 12–14% del traffico veicolare complessivo**, con concentrazioni più elevate nelle aree centrali e nelle fasce orarie di punta. A **Milano**, il Piano Urbano della Logistica Sostenibile (PULS) stima un incremento potenziale delle consegne urbane fino al **+70–80% entro il 2030**, in assenza di misure correttive strutturali, con conseguente aumento dei veicoli-km e delle emissioni correlate.

Dal punto di vista operativo, i mezzi impiegati nell'ultimo miglio percorrono mediamente tra **50 e 120 km al giorno per veicolo**, a seconda della densità urbana e del modello distributivo adottato. Tuttavia, ciò che incide maggiormente sull'efficienza non è la distanza complessiva, bensì la **densità di consegna**, espressa in numero di stop per chilometro. In aree centrali ad alta densità commerciale si possono registrare valori di **3–5 consegne per km**, mentre in zone periferiche tale valore può scendere sotto **1 consegna per km**, con drastica riduzione della produttività.

Le condizioni operative tipiche della distribuzione urbana – velocità medie comprese tra **15 e 25 km/h**, frequenti arresti e ripartenze – determinano un peggioramento significativo dell'efficienza energetica dei veicoli.

Un veicolo commerciale leggero diesel di classe Euro 6 presenta emissioni medie reali comprese tra **180 e 250 gCO₂/km** in ciclo urbano congestionato. Considerando un percorso medio giornaliero di

80 km, un singolo mezzo può generare **14–20 kg di CO₂ al giorno** solo per le operazioni di distribuzione urbana.

Se si considera un carico medio di 80–120 consegne per turno, l'intensità emissiva può variare tra **120 e 250 gCO₂ per consegna**, valore fortemente dipendente dalla densità territoriale e dal tasso di consegne fallite.

Le emissioni locali di NO_x per veicoli diesel leggeri in ambito urbano possono superare **0,4–0,6 g/km in condizioni reali di traffico**, contribuendo in modo rilevante ai superamenti dei limiti di qualità dell'aria nelle grandi città italiane.

Dal punto di vista economico-operativo, il parametro centrale è il **costo per stop**, funzione del costo orario del mezzo e della produttività del turno.

In un modello standard:

- costo orario complessivo veicolo + autista: **35–50 €/h**
- durata media turno urbano: **7–8 ore**
- numero medio consegne: **70–120 stop/turno**

Il costo medio diretto per consegna può quindi variare tra **2,5 € e 5 € per stop**, escludendo costi indiretti e di struttura.

Una riduzione della produttività anche del 15–20% (ad esempio per congestione o consegne fallite) può determinare un incremento del costo unitario superiore a **0,5–1 € per consegna**, incidendo significativamente sui margini operativi.

Il tasso di consegne non riuscite, stimato in ambito europeo tra **8% e 15% nel segmento B2C**, comporta riconsegne che aumentano:

- i km percorsi fino al **10–15%**
- il tempo totale di distribuzione fino al **20%**
- il costo marginale per consegna oltre il **25%**

(Edwards et al., 2010).

L'incremento dei veicoli per consegne urbane produce effetti anche sulla sicurezza stradale. I veicoli commerciali leggeri risultano coinvolti in circa **il 13–15% degli incidenti mortali nell'Unione Europea**, con una quota significativa concentrata in ambito urbano (European Commission, 2022).

In Italia, i dati ISTAT mostrano che gli incidenti che coinvolgono veicoli adibiti al trasporto merci rappresentano circa **il 10–12% degli incidenti urbani con lesioni**, con particolare incidenza nei contesti ad alta interazione con pedoni e ciclisti.

Le operazioni di sosta irregolare, carico/scarico in doppia fila e manovre di retromarcia costituiscono fattori di rischio aggiuntivi nei centri storici.

L'intensificazione delle consegne, legata alla crescita dell'e-commerce (incremento superiore al **+50% negli ultimi cinque anni in Italia**), ha prodotto un aumento della pressione sui lavoratori del settore.

Nel comparto della consegna urbana:

- una quota crescente di lavoratori opera con contratti a tempo determinato o forme para-subordinate;
- la remunerazione è spesso legata al numero di consegne effettuate;
- la produttività richiesta può superare **15–20 consegne/ora** nei modelli più intensivi.

Studi europei sul settore evidenziano fenomeni di precarizzazione e intensificazione del lavoro nel segmento last mile, con impatti su sicurezza, salute e qualità del servizio (Veen et al., 2020; ITF, 2021).

I dati quantitativi sopra richiamati mostrano come l'ultimo miglio concentri:

- una quota rilevante di veicoli-km urbani
- un'intensità emissiva elevata per unità di consegna
- costi operativi sensibili alla congestione
- impatti su sicurezza stradale
- pressioni sulle condizioni di lavoro

L'insieme di tali elementi conferma il carattere sistemico delle criticità analizzate. L'ultimo miglio non rappresenta soltanto un problema logistico, ma un nodo infrastrutturale, ambientale e sociale della mobilità urbana contemporanea.

Su questa base quantitativa e tecnica si innesta il capitolo successivo, dedicato all'analisi delle soluzioni oggi adottate o in fase di sperimentazione — elettrificazione delle flotte, micro-hub, ottimizzazione digitale, modelli collaborativi — valutate alla luce degli indicatori economici, ambientali e prestazionali qui evidenziati.

3.4 Soluzioni attuali per il trasporto merci dell'ultimo miglio

Come evidenziato nei Capitoli 3.1 e 3.3, l'ultimo miglio rappresenta la fase più critica della logistica urbana in termini di costi operativi, impatti ambientali e interferenze con il sistema della mobilità cittadina (Gevaers, Van de Voorde & Vanelslander, 2011; Lindholm & Browne, 2013). La crescita delle consegne legata allo sviluppo dell'e-commerce (Capitolo 3.2) ha ulteriormente amplificato tali criticità, rendendo evidente l'insostenibilità, nel medio-lungo periodo, di un modello di distribuzione basato esclusivamente su veicoli commerciali tradizionali (Allen et al., 2018; Browne et al., 2019). In questo contesto, negli ultimi anni si è assistito alla progressiva diffusione di soluzioni alternative e complementari, finalizzate a ridurre l'impatto del trasporto merci nelle aree urbane e a migliorare l'efficienza complessiva dei sistemi di distribuzione dell'ultimo miglio (Taniguchi, Thompson & Yamada, 2016).

Le soluzioni oggi adottate possono essere ricondotte a tre principali categorie: l'impiego di mezzi leggeri e a basso impatto ambientale (come bike courier ed e-cargo bike), l'introduzione di sistemi di consegna indiretta basati su locker e punti di ritiro automatizzati, e la progressiva elettrificazione delle flotte di consegna. Ciascuna di queste soluzioni risponde a specifiche criticità evidenziate nel Capitolo 3.3, ma presenta al contempo limiti strutturali che ne condizionano l'efficacia e la scalabilità (Savelsbergh & Van Woensel, 2016).

Bike courier ed e-cargo bike

L'utilizzo di corrieri in bicicletta e, più recentemente, di e-cargo bike rappresenta una delle risposte più diffuse alle problematiche di congestione e sostenibilità ambientale del trasporto merci urbano (Conway et al., 2017; Gruber, Kihm & Lenz, 2014). Tali mezzi risultano particolarmente adatti ai contesti ad alta densità insediativa, caratterizzati da brevi distanze di consegna, elevata frammentazione dei colli e presenza di zone a traffico limitato o aree pedonali. Dal punto di vista ambientale, l'adozione delle e-cargo bike consente una riduzione quasi totale delle emissioni locali e del rumore, contribuendo a mitigare alcuni degli impatti sociali evidenziati nel Capitolo 3.3 (Maes & Vanelslander, 2012).

Dal punto di vista operativo, tuttavia, l'efficacia di queste soluzioni è fortemente dipendente dal contesto urbano e dal modello logistico adottato. Le limitate capacità di carico e la ridotta autonomia operativa rendono le e-cargo bike idonee solo a una quota specifica della domanda di trasporto merci, prevalentemente costituita da piccoli colli e consegne ad alta frequenza (Melo & Baptista, 2017). La letteratura evidenzia inoltre come tali sistemi risultino economicamente sostenibili solo se inseriti all'interno di schemi di distribuzione multilivello, basati su micro-hub o centri di consolidamento urbano, che permettono di separare il trasporto di adduzione dal segmento finale della consegna (Schliwa et al., 2015). Ne deriva che le e-cargo bike non possono essere considerate una soluzione universale, ma piuttosto uno strumento mirato, efficace in specifiche condizioni operative.

Locker e punti di ritiro automatizzati

Un secondo filone di intervento riguarda l'introduzione di locker automatici e punti di ritiro condivisi, che modificano in modo sostanziale il paradigma tradizionale della consegna a domicilio (Deutsch & Golany, 2018). Come discusso nel Capitolo 3.3, una quota rilevante dei costi dell'ultimo miglio è associata ai tentativi di consegna falliti e alle conseguenti riprogrammazioni dei giri di distribuzione (Gevaers et al., 2014). I sistemi di ritiro automatizzato consentono di ridurre significativamente tali inefficienze, aumentando il tasso di successo della consegna al primo tentativo e migliorando l'utilizzo delle risorse di trasporto (Vakulenko, Hellström & Hjort, 2018).

Dal punto di vista metodologico, l'analisi di questa soluzione evidenzia come i benefici in termini di costi e sostenibilità dipendano fortemente dalla localizzazione dei locker, dalla densità della domanda e dal grado di accettazione da parte degli utenti finali (Iwan, Kijewska & Lemke, 2016). L'installazione di tali infrastrutture richiede investimenti iniziali rilevanti e un'attenta pianificazione urbana, al fine di evitare effetti controproducenti, quali l'aumento degli spostamenti individuali per il ritiro dei pacchi (Lemke, Iwan & Korczak, 2016). Anche in questo caso, i locker si configurano come una soluzione complementare, efficace se integrata in una strategia complessiva di city logistics e non come intervento isolato.

Veicoli elettrici per le consegne urbane

La progressiva elettrificazione delle flotte di consegna rappresenta una delle principali direttrici di intervento per la riduzione dell'impatto ambientale del trasporto merci urbano (Taefi et al., 2016). L'impiego di veicoli elettrici consente di eliminare le emissioni allo scarico e di ridurre l'inquinamento acustico, risultando particolarmente coerente con le politiche di accesso

regolamentato ai centri urbani e con l'istituzione di zone a basse o zero emissioni, richiamate nel Capitolo 3.3 (Dablanc et al., 2017).

Tuttavia, l'analisi dei costi e delle prestazioni operative mostra come tali veicoli presentino ancora alcune criticità, legate principalmente ai costi di investimento iniziali, all'autonomia limitata e alla necessità di infrastrutture di ricarica dedicate (Feng & Figliozzi, 2013; Lebeau et al., 2015). I benefici economici e ambientali risultano fortemente dipendenti dal profilo delle missioni di consegna e dalla possibilità di riorganizzare i giri in funzione delle nuove caratteristiche dei mezzi (Van Duin et al., 2013). Di conseguenza, anche la transizione verso flotte elettriche richiede un ripensamento complessivo dei modelli di distribuzione dell'ultimo miglio, in linea con le considerazioni sistemiche sviluppate nei capitoli precedenti.

Soluzioni emergenti e inquadramento metodologico

Accanto alle soluzioni oggi operative, la letteratura analizza numerose tecnologie emergenti, tra cui sistemi automatizzati, robot terrestri e droni per la consegna delle merci (Boysen, Fedtke & Schwerdfeger, 2021). Tali soluzioni presentano un elevato potenziale teorico in termini di riduzione dei tempi di consegna e superamento delle criticità legate alla congestione stradale. Tuttavia, come già anticipato nel Capitolo 3.3, esse risultano attualmente limitate da vincoli normativi, problemi di sicurezza e difficoltà di integrazione con i sistemi logistici esistenti (Goodchild & Toy, 2018; Otto et al., 2018).

Dal punto di vista metodologico, è pertanto opportuno distinguere tra soluzioni già applicabili su larga scala e tecnologie ancora in fase di sperimentazione, evitando di attribuire a queste ultime un ruolo risolutivo nel breve periodo (McKinnon et al., 2020). In questa tesi, le soluzioni emergenti vengono considerate come possibili elementi di integrazione futura, il cui contributo deve essere valutato in relazione al contesto urbano, alla struttura della domanda e alle infrastrutture esistenti.

In sintesi, le soluzioni attualmente adottate per il trasporto merci dell'ultimo miglio rispondono in modo parziale alle criticità di costo, sostenibilità e congestione analizzate nei Capitoli 3.1–3.3. Nessuna di esse, considerata singolarmente, è in grado di risolvere in maniera definitiva le problematiche del sistema, mentre i risultati più significativi si ottengono attraverso approcci integrati e multilivello (Taniguchi et al., 2016). In questo quadro, i droni per la consegna delle merci si collocano come una possibile evoluzione dei modelli logistici esistenti, più che come una loro sostituzione. Il capitolo successivo approfondirà quindi il tema dell'integrazione dei droni nei sistemi

logistici dell'ultimo miglio, analizzandone il potenziale ruolo, i limiti applicativi e le condizioni necessarie affinché possano configurarsi come una soluzione effettivamente sostenibile.

3.5 Integrazione dei droni nei sistemi logistici esistenti: possono essere una soluzione?

Come discusso nei paragrafi precedenti (§§3.1–3.4), le criticità strutturali dell'ultimo miglio in ambito urbano hanno alimentato un crescente interesse verso soluzioni tecnologiche alternative ai modelli di distribuzione tradizionali (Lim et al., 2018; Allen et al., 2018). In tale contesto, l'impiego dei droni per la consegna delle merci rappresenta una delle opzioni più studiate in letteratura, sebbene ancora caratterizzata da un livello di maturità applicativa limitato (Merkert & Bushell, 2020).

Le principali review sistematiche sul tema convergono nel sottolineare che i droni non debbano essere considerati come un mezzo sostitutivo dei veicoli terrestri, bensì come una tecnologia complementare, integrabile in sistemi logistici multimodali (Macrina et al., 2020; Rejeb et al., 2023). In particolare, la systematic literature review di **Jazairy et al. (2025)**, basata sull'analisi di oltre 300 articoli interdisciplinari, evidenzia come il valore dei droni emerga soprattutto in configurazioni ibride, nelle quali essi operano in coordinamento con furgoni o hub urbani, piuttosto che come modalità di consegna autonoma. Gli autori sottolineano come tale approccio risulti coerente con la natura frammentata dell'ultimo miglio e con le criticità di congestione e costo già discusse nel §3.3 (Jazairy et al., 2025).

Dal punto di vista ambientale, diverse rassegne dello stato dell'arte indicano che i droni elettrici possono contribuire alla riduzione delle emissioni di gas climalteranti per consegna, soprattutto se confrontati con veicoli endotermici e se utilizzati per pacchi leggeri e distanze contenute (Figliozzi, 2020; Kellermann et al., 2020). La review di **Garg et al. (2023)**, pubblicata su *Transportation Research Part D*, evidenzia come i benefici ambientali siano fortemente dipendenti dal contesto operativo e dal mix energetico utilizzato per la ricarica delle batterie, mettendo in guardia da valutazioni semplificate che non considerano l'intero ciclo di vita del sistema di consegna. Tale impostazione risulta coerente con le riflessioni sviluppate nel §3.3 in merito alla necessità di analisi di sostenibilità di tipo sistemico (Garg et al., 2023).

Sotto il profilo economico, la letteratura presenta risultati eterogenei. Alcuni studi modellistici riportano potenziali riduzioni dei costi di consegna, attribuite principalmente alla diminuzione dei costi del lavoro umano e alla maggiore rapidità delle operazioni (Murray & Chu, 2015; Dorling et al., 2017). Tuttavia, come evidenziato nella review **Unmanned Aerial Vehicles in Last-Mile Parcel Delivery: A State-of-the-Art Review** (Buldeo Rai et al., 2022), tali benefici risultano altamente

sensibili a fattori quali la densità della domanda, la capacità di carico del drone e la necessità di infrastrutture di supporto, che possono ridurre o annullare i vantaggi economici su scala urbana. Questo aspetto richiama direttamente le criticità di costo dell'ultimo miglio tradizionale analizzate nel §3.3, mostrando come i droni non eliminino il problema, ma ne ridefiniscano la struttura.

Un contributo particolarmente rilevante in termini di integrazione operativa è fornito dallo studio **Drone Integration in Last-Mile Delivery Operations** (Gunaratne et al., 2022), che analizza in modo specifico le modalità di coordinamento tra droni, veicoli terrestri e sistemi informativi logistici. Gli autori mostrano come i modelli camion-drone consentano di ridurre il numero di fermate stradali e di migliorare l'efficienza complessiva delle rotte, soprattutto in contesti urbani congestionati (Gunaratne et al., 2022). Tale configurazione appare coerente con le soluzioni di mitigazione analizzate nel §3.4, dalle quali tuttavia si distingue per il maggiore potenziale trasformativo nel medio-lungo periodo.

Le applicazioni più mature e documentate in letteratura riguardano le consegne time-critical e ad alto valore, in particolare nel settore sanitario. La review **Last-Mile Drone Delivery: Past, Present, and Future** (Banik et al., 2022) evidenzia come i droni abbiano già dimostrato un'elevata efficacia nella distribuzione di sangue, farmaci e campioni biologici, con riduzioni significative dei tempi di consegna rispetto ai mezzi terrestri, specialmente in aree difficilmente accessibili (Mateen et al., 2020; Banik et al., 2022). Sebbene tali casi non siano immediatamente estendibili al mercato di massa dell'e-commerce, essi dimostrano che i droni possono costituire una soluzione strutturale per specifici segmenti dell'ultimo miglio, e non soltanto una tecnologia sperimentale.

Nonostante questi risultati promettenti, tutte le principali review concordano nel segnalare l'esistenza di limiti rilevanti che ne ostacolano la diffusione su larga scala. Tra questi, assumono particolare rilievo la limitata capacità di carico, l'autonomia energetica ridotta, la vulnerabilità alle condizioni meteorologiche e, soprattutto, le restrizioni normative legate alla sicurezza, alla privacy e alla gestione dello spazio aereo urbano (Rathore et al., 2022; Jazairy et al., 2025). Come sottolineato dalla review sistematica di Jazairy et al. (2025), tali vincoli rappresentano oggi uno dei principali fattori di incertezza per l'adozione dei droni nella logistica urbana, analogamente a quanto osservato per altre soluzioni innovative discusse nel §3.4.

Alla luce delle evidenze emerse, i droni non possono essere considerati una soluzione immediata e universale alle criticità dell'ultimo miglio. Tuttavia, a differenza delle soluzioni attualmente implementate, essi presentano un potenziale di sviluppo di lungo periodo, legato all'evoluzione tecnologica, normativa e infrastrutturale (Merkert & Bushell, 2020; Garg et al., 2023). Come

evidenziato dalle principali review analizzate, il contributo dei droni risulta particolarmente significativo quando essi vengono integrati in sistemi logistici esistenti e utilizzati in modo selettivo, piuttosto che come sostituti totali dei mezzi tradizionali (Macrina et al., 2020; Jazairy et al., 2025).

Questo capitolo, in continuità con i §§3.3 e 3.4, mostra quindi come i droni possano essere interpretati non come una soluzione intermedia, ma come una possibile direzione evolutiva strutturale della logistica dell'ultimo miglio, la cui effettiva applicabilità dipenderà dalla capacità di superare le attuali barriere tecniche, economiche e regolatorie.

3.6 Previsioni sulla consegna delle merci nel medio-lungo periodo

L'analisi delle criticità economiche e operative dell'ultimo miglio sviluppata nel §3.3 ha evidenziato come l'attuale configurazione dei sistemi di distribuzione urbana presenti limiti strutturali difficilmente superabili attraverso interventi incrementali (Dabanc, 2014; Lim et al., 2018). In particolare, l'elevata incidenza dei costi di manodopera, la frammentazione delle consegne e l'inefficienza legata ai tempi di percorrenza urbani costituiscono elementi che, in prospettiva, tenderanno ad accentuarsi in presenza di una domanda in continua crescita (Allen et al., 2018; ITF, 2021).

Come discusso nel §3.2, tale crescita è strettamente connessa all'evoluzione dell'e-commerce e ai cambiamenti nei modelli di consumo, che stanno progressivamente spostando il baricentro della logistica verso consegne sempre più frequenti, rapide e personalizzate (Mangiaracina et al., 2019; OECD, 2020). Le previsioni elaborate dalla letteratura indicano che, nel medio periodo, l'aumento del numero di consegne per unità di superficie urbana rischia di tradursi in un incremento proporzionale dei costi operativi, se i modelli di distribuzione resteranno ancorati a schemi tradizionali basati su veicoli stradali e consegne punto-punto (McKinsey & Company, 2022; World Economic Forum, 2023).

Nel medio periodo, gli studi prospettici concordano nel ritenere che le soluzioni attualmente adottate – quali micro-hub urbani, locker e veicoli elettrici leggeri – continueranno a svolgere un ruolo centrale nel contenimento delle criticità analizzate nel §3.3 (Browne et al., 2019; Civitas, 2020). Tuttavia, come già evidenziato nel §3.4, tali soluzioni agiscono prevalentemente sull'ottimizzazione del sistema esistente, senza incidere in modo sostanziale sulle componenti di costo più rigide, in particolare quelle legate alla presenza dell'operatore umano nella fase di consegna finale (Gevaers et al., 2014; ITF, 2021).

In questo contesto, la letteratura individua una progressiva ricerca di soluzioni in grado di ridurre il costo marginale per consegna e di aumentare la scalabilità del servizio nel lungo periodo (OECD, 2020; Deloitte, 2021). Come introdotto nel §3.5, le tecnologie emergenti – e in particolare i droni per la consegna delle merci – vengono sempre più spesso interpretate non come soluzioni temporanee o sperimentali, ma come potenziali elementi strutturali di futuri sistemi logistici integrati (Goodchild & Toy, 2018; Jazairy et al., 2025). Le previsioni di lungo periodo suggeriscono infatti che, in presenza di adeguati sviluppi normativi e infrastrutturali, i droni potrebbero contribuire a superare alcune delle inefficienze intrinseche dei modelli tradizionali dell'ultimo miglio (PwC, 2022; ITF, 2023).

È tuttavia importante sottolineare, in continuità con quanto discusso nel §3.5, che l'adozione dei droni non è destinata a sostituire integralmente le modalità di consegna esistenti (Jazairy et al., 2025). Le analisi prospettiche indicano piuttosto uno scenario di specializzazione funzionale, in cui i droni operano in modo complementare rispetto ai sistemi terrestri, risultando particolarmente adatti per specifiche tipologie di merci, per consegne urgenti o in contesti urbani caratterizzati da elevata congestione e difficoltà di accesso (Otto et al., 2018; WEF, 2023).

Nel complesso, le previsioni sul medio-lungo periodo delineano un'evoluzione dell'ultimo miglio verso sistemi logistici sempre più complessi e multimodali, in cui l'efficienza non sarà determinata da una singola tecnologia, ma dalla capacità di integrazione tra soluzioni tradizionali e innovative (ITF, 2021; OECD, 2020). Questo quadro conferma l'impostazione adottata nel Capitolo 3, che ha analizzato l'ultimo miglio come un sistema dinamico, le cui criticità economiche e operative costituiscono il principale motore dell'innovazione tecnologica e organizzativa (Lim et al., 2018).

Le previsioni delineate in questo capitolo evidenziano come l'evoluzione dell'ultimo miglio non possa essere valutata esclusivamente sulla base delle potenzialità tecnologiche delle soluzioni emergenti, ma richieda un'analisi approfondita del quadro normativo, regolamentare e operativo entro cui tali soluzioni possono essere effettivamente implementate (Deloitte, 2021; ITF, 2023). In particolare, nel caso dei droni per la consegna delle merci, la loro integrazione nei sistemi logistici urbani dipende in misura determinante dalle condizioni di sicurezza, dalle tipologie di velivoli impiegabili, dalle caratteristiche delle merci trasportabili e dalle piattaforme software di gestione e controllo (EASA, 2021; ENAC, 2022).

Alla luce di queste considerazioni, il Capitolo 4 è dedicato all'analisi dello stato dell'arte delle applicazioni dei droni nella logistica, con un focus sulla normativa vigente a livello europeo e nazionale, sui principali progetti e casi studio già operativi o sperimentali, nonché sulle caratteristiche tecniche dei droni, dei sistemi di manutenzione e delle soluzioni software di supporto (WEF, 2023;

PwC, 2022). Tale analisi costituisce un passaggio fondamentale per valutare in modo critico la reale fattibilità delle previsioni discusse nel presente capitolo e per comprendere in che misura i droni possano rappresentare, nel medio-lungo periodo, una soluzione concreta e sostenibile per il trasporto merci dell'ultimo miglio.

4. STATO DELL'ARTE

4.1 Progetti e casi studio esistenti

L'evoluzione dei sistemi logistici è fortemente influenzata dall'introduzione di tecnologie digitali e di automazione avanzata, che mirano a migliorare l'efficienza operativa, la resilienza delle reti distributive e la rapidità del servizio (Christopher, 2016; Ivanov, 2020). In tale contesto, l'impiego dei droni per il trasporto di merci rappresenta una delle soluzioni più innovative e, al tempo stesso, più complesse dal punto di vista tecnico, operativo e regolatorio (Goodchild & Toy, 2018; Otto et al., 2018).

Coerentemente con l'impostazione metodologica adottata nel Capitolo 3, l'analisi dello stato dell'arte viene qui sviluppata attraverso l'esame di progetti reali e casi studio significativi, selezionati non come meri esempi applicativi, ma come strumenti analitici utili a comprendere il livello di maturità tecnologica raggiunto dal settore e le principali criticità ancora aperte (Yin, 2018).

Dal punto di vista metodologico, i casi studio considerati sono stati individuati sulla base di tre criteri fondamentali:

1. rilevanza tecnologica, intesa come utilizzo di piattaforme UAV e sistemi di controllo del volo avanzati (Clothier et al., 2015);
2. grado di maturità operativa, privilegiando progetti che abbiano superato la fase puramente sperimentale (FAA, 2022);
3. varietà del contesto applicativo, al fine di includere sia scenari urbani sia contesti rurali e sanitari (WHO, 2020).

Tale approccio consente di costruire un quadro comparativo coerente, funzionale all'analisi tecnica sviluppata nei paragrafi successivi del presente capitolo.

Uno dei casi di studio più rilevanti è rappresentato dal programma **Amazon Prime Air**, promosso con l'obiettivo di integrare la consegna tramite droni all'interno della rete logistica di un grande operatore globale dell'e-commerce (Amazon, 2022). Il progetto si caratterizza per l'impiego di droni con configurazione ibrida, capaci di combinare decollo e atterraggio verticale con una fase di volo di crociera efficiente. Un aspetto centrale dell'iniziativa riguarda lo sviluppo di sistemi avanzati di sicurezza e di rilevamento degli ostacoli, nonché il dialogo continuo con le autorità aeronautiche per l'ottenimento delle necessarie autorizzazioni operative (FAA, 2022). Come evidenziato dalla

documentazione tecnica e regolatoria prodotta, Prime Air rappresenta un caso emblematico delle sfide legate all'implementazione della drone delivery in contesti urbani complessi, caratterizzati da elevata densità abitativa e da stringenti requisiti di sicurezza.

Di particolare interesse, per la sua applicazione in un contesto differente, è il progetto sviluppato da **Zipline**, focalizzato sul trasporto di materiali sanitari in aree remote o difficilmente accessibili (Zipline, 2021). Come già accennato nel Capitolo 3 in relazione ai modelli logistici resilienti, Zipline dimostra come i droni possano costituire una soluzione efficace per superare le limitazioni infrastrutturali tradizionali (WHO, 2020). L'azienda impiega droni ad ala fissa, caratterizzati da elevata autonomia e da un sistema di lancio e recupero dedicato, riducendo la complessità delle operazioni di atterraggio. Questo caso studio è particolarmente rilevante poiché evidenzia come l'adozione della tecnologia UAV possa generare benefici concreti in termini di affidabilità del servizio e riduzione dei tempi di consegna in ambiti critici (Amukele et al., 2017).

Un ulteriore contributo allo stato dell'arte è fornito dal progetto **Wing**, che si colloca principalmente nel contesto della consegna urbana di piccoli pacchi (Wing Aviation, 2019). L'approccio adottato da Wing pone una forte enfasi sull'integrazione dei droni nello spazio aereo a bassa quota e sulla gestione del traffico, anticipando temi che verranno approfonditi nel §4.3 in relazione ai software di gestione e ai sistemi UTM (NASA, 2020). I droni utilizzati sono progettati per operare in prossimità di aree residenziali, con soluzioni tecniche orientate alla riduzione del rischio al suolo e dell'impatto acustico (Wing Aviation, 2019).

Nel panorama europeo, il progetto **Parcelcopter** sviluppato da **DHL** rappresenta un esempio significativo di sperimentazione nel settore della logistica commerciale (DHL, 2016). Le attività di test si sono concentrate su collegamenti in aree isolate e su tratte di breve e media distanza, mettendo in evidenza il potenziale dei droni come soluzione complementare ai sistemi di trasporto convenzionali. Analogamente, **UPS**, attraverso il programma **UPS Flight Forward**, ha esplorato l'impiego dei droni in ambito sanitario e ospedaliero, ottenendo certificazioni operative che testimoniano un avanzato livello di maturità del sistema (UPS, 2019; FAA, 2020).

Nel complesso, l'analisi dei casi studio evidenzia come il settore della consegna tramite droni sia caratterizzato da una notevole eterogeneità in termini di soluzioni tecnologiche, modelli operativi e contesti applicativi (Otto et al., 2018). Tale varietà riflette la necessità di adattare la progettazione dei droni e delle infrastrutture di supporto alle specifiche esigenze della missione, come verrà discusso in dettaglio nel §4.2. I casi analizzati costituiscono pertanto una base di riferimento essenziale per

comprendere le scelte tecniche relative alle tipologie di droni, ai software di gestione (§4.3), alle merci trasportabili (§4.4) e, infine, al quadro normativo e di sicurezza (§4.5).

4.2 Tipologia di droni e manutenzione

Come anticipato nell'Introduzione, l'analisi dei sistemi a pilotaggio remoto destinati al trasporto di merci richiede un approccio sistemico, nel quale la configurazione aeronautica del velivolo, il sistema propulsivo ed energetico, la dinamica di volo e le strategie di manutenzione risultano strettamente interdipendenti (Austin, 2010; Valavanis e Vachtsevanos, 2015). La tipologia di drone adottata incide infatti in modo diretto sulle grandezze fisiche fondamentali del sistema – massa, dimensioni, carico utile e autonomia – e, di conseguenza, sulle sollecitazioni strutturali, sul consumo energetico e sull'usura dei componenti lungo l'intero ciclo operativo (Floreano e Wood, 2015).

Nel contesto della logistica aerea, la letteratura individua nella modalità di generazione della portanza il criterio più efficace per classificare i droni, distinguendo principalmente tra piattaforme multirottore, ad ala fissa e ibride VTOL (Watts, Ambrosia e Hinkley, 2012; Valavanis e Vachtsevanos, 2015). Questa distinzione assume particolare rilevanza nel segmento dei droni da medio carico, con payload compresi indicativamente tra 8 e 15 kg, poiché in tale intervallo di masse le scelte progettuali iniziano a produrre differenze sostanziali non solo in termini di prestazioni, ma anche di sostenibilità energetica e manutentiva (Shakhatreh et al., 2019).

I droni multirottore rappresentano, anche in questa fascia di carico, la soluzione concettualmente più semplice e flessibile dal punto di vista operativo. La capacità di decollo e atterraggio verticale e la possibilità di mantenere il volo stazionario rendono queste piattaforme particolarmente adatte a contesti urbani o a infrastrutture logistiche compatte (Floreano e Wood, 2015). Tuttavia, quando il payload trasportato si colloca nell'intervallo 8–15 kg, emergono con chiarezza i limiti intrinseci di questa configurazione. La necessità di generare continuamente portanza tramite la spinta dei rotori comporta una richiesta di potenza elevata e pressoché costante, che si traduce in un consumo energetico significativo e in un'autonomia fortemente limitata (Patterson e Rao, 2018). Anche con batterie di grande capacità, i multirotori di medio carico raramente superano autonomie operative dell'ordine di 15–25 minuti, soprattutto quando il profilo di missione prevede hovering prolungato o manovre ripetute (Shakhatreh et al., 2019).

Dal punto di vista dimensionale e di massa, un multirottore progettato per trasportare carichi compresi tra 8 e 15 kg presenta tipicamente una massa massima al decollo che può superare i 20–30 kg, considerando la struttura, i sistemi propulsivi e il pacco batterie (Valavanis e Vachtsevanos, 2015).

In queste condizioni, il sistema energetico assume un ruolo dominante nel bilancio di massa. Le batterie utilizzate sono generalmente pacchi LiPo ad alta capacità, con tensioni nominali comprese tra 22,2 V e 44,4 V, corrispondenti a configurazioni da 6S a 12S, e capacità che possono variare indicativamente tra 16 Ah e 30 Ah per singolo pacco (Zhang et al., 2018). La massa di una singola batteria può superare i 2–3 kg, rendendo frequente l'impiego di più pacchi collegati in parallelo per soddisfare le richieste di corrente durante il volo verticale (Floreano e Wood, 2015).

In questo contesto, il parametro del C-rating assume un'importanza cruciale. Nei multirotori di medio carico, le correnti di picco richieste durante il decollo e le manovre possono raggiungere valori molto elevati, rendendo necessarie batterie in grado di sostenere scariche significative senza surriscaldamento (Zhang et al., 2018). L'utilizzo di C-rating nominali dell'ordine di 10–15C rappresenta un compromesso tra prestazioni e durata, ma comporta comunque un'accelerazione del degrado delle celle, con una vita utile tipicamente limitata a poche centinaia di cicli (Barreras et al., 2015). Dal punto di vista manutentivo, ciò implica una gestione rigorosa delle batterie, con monitoraggio costante delle tensioni di cella, della temperatura e della capacità residua (Plett, 2015).

La collocazione delle batterie nei multirotori di medio carico è generalmente prossima al baricentro del velivolo, all'interno della fusoliera centrale o immediatamente al di sotto della struttura portante, al fine di minimizzare gli effetti della variazione di massa sulla dinamica di volo (Valavanis e Vachtsevanos, 2015). In molte piattaforme professionali, i pacchi batteria sono progettati come moduli estraibili, facilmente rimovibili tramite sportelli o guide dedicate, consentendo la sostituzione rapida della batteria scarica con una carica. Questa soluzione risponde a esigenze operative precise: i tempi di ricarica, che possono variare da una a diverse ore a seconda della capacità e della corrente di carica adottata, risultano incompatibili con operazioni logistiche ad alta frequenza, rendendo preferibile la separazione tra ciclo di volo e ciclo di ricarica (Goodchild e Toy, 2018).

Accanto ai multirotori, i droni ibridi VTOL rappresentano una soluzione sempre più rilevante proprio nel segmento di medio carico. In queste piattaforme, la possibilità di effettuare decollo e atterraggio verticale viene combinata con una fase di crociera su ala fissa, durante la quale la portanza è generata aerodinamicamente e non tramite la spinta dei rotori (Stepaniak et al., 2018). Questo approccio consente di ridurre drasticamente la potenza richiesta nella fase di volo traslato e di migliorare in modo significativo l'efficienza energetica complessiva (Patterson e Rao, 2018).

Nel confronto diretto tra multirotori e VTOL per payload compresi tra 8 e 15 kg, il vantaggio dei sistemi VTOL emerge soprattutto in termini di autonomia e gestione energetica. Studi di progetto mostrano come droni VTOL di questa classe possano raggiungere autonomie superiori ai 60–90

minuti e coprire distanze dell'ordine di diverse decine di chilometri, con velocità di crociera tipicamente comprese tra 20 e 25 m/s (Stepaniak et al., 2018). A parità di carico utile, il sistema energetico di un VTOL può quindi essere dimensionato privilegiando la densità energetica piuttosto che la densità di potenza, riducendo le correnti medie di scarica e lo stress termico sulle batterie (Zhang et al., 2018).

Dal punto di vista delle batterie, i droni VTOL di medio carico impiegano anch'essi pacchi LiPo o Li-ion ad alta capacità, spesso in configurazioni 6S o 8S, con capacità dell'ordine di 12–20 Ah per pacco (Valavanis e Vachtsevanos, 2015). Tuttavia, grazie alla fase di crociera su ala, il profilo di scarica risulta meno impulsivo rispetto a quello di un multirottore puro. Ciò consente, in molti casi, l'impiego di batterie con C-rating inferiori e una maggiore durata nel tempo, a beneficio della sostenibilità manutentiva del sistema (Barreras et al., 2015). Anche in questo caso, le batterie sono installate in prossimità del baricentro e progettate come moduli estraibili, favorendo la sostituzione rapida e il tracciamento dei cicli di utilizzo (Plett, 2015).

Un ulteriore elemento di differenziazione tra multirotori e VTOL riguarda l'impatto del carico sulla dinamica di volo. Nei multirotori, l'aumento del payload si traduce direttamente in un incremento della potenza necessaria per l'hovering, amplificando le sollecitazioni su motori, eliche ed ESC e aumentando la sensibilità a fenomeni vibratorii (Floreano e Wood, 2015). Nei VTOL, al contrario, il carico influisce in modo più marcato sulla fase di decollo verticale e sulla transizione, mentre durante la crociera il peso aggiuntivo viene in larga parte compensato dalla portanza aerodinamica dell'ala (Patterson e Rao, 2018). Questa differenza si riflette anche sulle strategie di manutenzione: nei multirotori di medio carico, l'usura dei componenti propulsivi e delle batterie risulta più rapida e ciclica, mentre nei VTOL la manutenzione tende a distribuirsi in modo più equilibrato tra sistema propulsivo, struttura alare e meccanismi di transizione (Shakhatreh et al., 2019).

In entrambi i casi, la gestione del sistema batteria assume un ruolo centrale. La presenza di un Battery Management System integrato consente il monitoraggio continuo delle condizioni operative, la prevenzione di sovraccarichi e sovrascariche e l'interazione con il sistema di controllo di volo per la pianificazione energetica della missione (Plett, 2015). Nei droni di medio carico destinati al trasporto di merci di valore o sensibili, questa integrazione rappresenta un requisito imprescindibile per garantire livelli adeguati di sicurezza e affidabilità (Barreras et al., 2015).

In questo contesto, la crescente adozione di batterie modulari e facilmente sostituibili nei droni da medio carico introduce una dimensione operativa che va oltre il singolo velivolo e coinvolge l'infrastruttura logistica nel suo complesso. La separazione tra il ciclo di volo del drone e il ciclo di

ricarica delle batterie rende infatti sempre più rilevante il ruolo delle stazioni di atterraggio e dei punti di scambio energetico, concepiti come nodi in grado di supportare la sostituzione rapida dei pacchi batteria, la loro ricarica in sicurezza e la gestione del flusso operativo dei mezzi (Goodchild e Toy, 2018). Tali infrastrutture, pur non incidendo direttamente sulle prestazioni aerodinamiche del singolo UAV, influenzano in modo significativo l'efficienza complessiva del sistema logistico e la continuità del servizio, costituendo un elemento chiave nell'integrazione dei droni all'interno di reti di trasporto più ampie. Proprio per questo motivo, il tema delle stazioni di atterraggio e delle infrastrutture di supporto energetico verrà approfondito nel Capitolo 5, dove verrà analizzato il loro ruolo nel garantire operatività, scalabilità e sostenibilità delle soluzioni di drone delivery.

In conclusione, l'analisi comparativa tra droni multirottore e VTOL nel range di carico 8–15 kg evidenzia come la scelta della tipologia influenzi in modo determinante la progettazione del sistema batteria, le modalità di ricarica e sostituzione e, più in generale, l'intero approccio alla manutenzione. Nei multirotori, la semplicità operativa e la flessibilità si accompagnano a un elevato stress energetico e a una rapida ciclicità delle batterie, mentre nei VTOL l'aumento di complessità progettuale è compensato da una maggiore efficienza energetica e da una gestione più sostenibile del sistema di accumulo (Shakhatreh et al., 2019). Questo equilibrio tra prestazioni, autonomia e manutenzione rappresenta uno dei nodi centrali nello sviluppo dei droni logistici di medio carico e anticipa le considerazioni che verranno approfondite nei successivi capitoli in relazione agli aspetti normativi e di sicurezza.

4.3 Software di gestione del volo dei droni e ottimizzazione delle scelte operative

Come già emerso dall'analisi dei progetti applicativi e dei casi studio presentati nel §4.1, nonché dalla descrizione delle tipologie di droni e delle relative implicazioni manutentive sviluppata nel §4.2, l'evoluzione dei sistemi UAV impiegati in ambito logistico e nel trasporto merci è strettamente connessa allo sviluppo di architetture software sempre più complesse, affidabili e integrate (Beard e McLain, 2012; PX4 Development Team, 2020). In tale contesto, il software di gestione del volo non può più essere interpretato come un semplice strato funzionale deputato alla stabilizzazione del mezzo, ma deve essere considerato come l'elemento centrale attraverso cui convergono modellazione matematica, ingegneria del controllo, pianificazione algoritmica e coordinamento operativo su scala di sistema (Siciliano et al., 2010; Bouabdallah et al., 2004).

Nei moderni droni destinati ad applicazioni di delivery, il livello informatico assume infatti il ruolo di vero e proprio abilitatore dell'autonomia, trasformando una piattaforma aeronautica dotata di sensori e attuatori in un sistema cyber-fisico capace di prendere decisioni, adattarsi al contesto

operativo, gestire situazioni anomale e inserirsi in ambienti complessi quali quelli urbani (Lee, 2008; Crainic et al., 2009). Tale prospettiva risulta pienamente coerente con l'impostazione metodologica adottata nei capitoli precedenti, dove il drone è stato progressivamente inquadrato non come oggetto isolato, ma come componente di un ecosistema logistico più ampio, caratterizzato da vincoli infrastrutturali, organizzativi e normativi (Taniguchi et al., 2001; Dabanc, 2009).

Un primo elemento distintivo dei sistemi di gestione del volo contemporanei è rappresentato dalla loro architettura stratificata, progettata per rispondere a requisiti eterogenei in termini di tempi di esecuzione, affidabilità e carico computazionale (PX4 Development Team, 2020; ArduPilot Dev Team, 2021). Nella descrizione delle piattaforme hardware e dei sistemi di controllo più diffusi, le flight stack moderne adottano una separazione netta tra i livelli di controllo real-time e quelli di pianificazione e supervisione, riflettendo una precisa scelta ingegneristica orientata alla sicurezza e alla scalabilità (Koubaa et al., 2019).

Il livello più basso dell'architettura è costituito dall'autopilota, ovvero dal modulo software che opera sul flight controller ed è responsabile dell'esecuzione dei loop di controllo ad alta frequenza, includendo la stabilizzazione dell'assetto, la regolazione delle velocità angolari e la generazione dei comandi per gli attuatori (Bouabdallah et al., 2004; Beard e McLain, 2012). Questi processi sono soggetti a vincoli temporali stringenti e devono garantire comportamento deterministico, poiché eventuali latenze o instabilità possono compromettere la sicurezza del volo (Stellin et al., 2016). Al di sopra di questo livello si colloca il cosiddetto companion computer, che ospita funzioni computazionalmente più onerose e meno vincolate dal punto di vista real-time, quali algoritmi di visione artificiale, localizzazione avanzata, pianificazione delle traiettorie e logiche decisionali di alto livello (Quigley et al., 2009; Koubaa et al., 2019). A completare l'architettura, la stazione di controllo a terra svolge il ruolo di interfaccia di supervisione, configurazione e monitoraggio, risultando particolarmente rilevante nelle fasi di pianificazione delle missioni e di analisi delle prestazioni operative (PX4 Development Team, 2020).

Questa articolazione modulare, che emerge con chiarezza anche nei casi studio discussi nel §4.1, assume un'importanza ancora maggiore quando il drone è inserito in un contesto di flotta, come avviene nelle applicazioni di consegna automatizzata (Crainic et al., 2009; Taniguchi et al., 2001). In tali scenari, il software di bordo deve essere in grado di interagire in modo strutturato con componenti esterni, mantenendo al contempo un'elevata autonomia decisionale per garantire la sicurezza operativa anche in presenza di comunicazioni intermittenti o di vincoli dinamici imposti dall'ambiente circostante (Maio, 2017).

Alla base di ogni funzione di controllo e pianificazione vi è la stima affidabile dello stato del sistema, che rappresenta uno degli aspetti computazionalmente più critici dell'intero software di gestione del volo (Beard e McLain, 2012). Come mostrato nei modelli di dinamica e controllo analizzati nel §4.2, il drone è un sistema fortemente non lineare e sotto-attuato, la cui stabilità dipende in modo diretto dalla qualità delle informazioni disponibili su posizione, velocità, assetto e accelerazioni (Bouabdallah et al., 2004; Garzarella, 2021). Tali grandezze, tuttavia, non sono misurabili direttamente, ma devono essere ricostruite attraverso processi di fusione sensoriale che integrano dati eterogenei e affetti da rumore (Kalman, 1960; Julier e Uhlmann, 1997).

In questo contesto, il software di volo implementa filtri di stima avanzati, tipicamente basati su formulazioni bayesiane, che consentono di combinare modelli dinamici e misure sensoriali per ottenere una rappresentazione coerente dello stato del sistema (Welch e Bishop, 2006). Dal punto di vista dell'ingegneria informatica, la stima dello stato non costituisce un modulo isolato, bensì un servizio centrale che alimenta l'intera catena decisionale del drone: eventuali errori sistematici o instabilità nella stima possono infatti propagarsi ai livelli di controllo e pianificazione, compromettendo la sicurezza dell'operazione (Beard e McLain, 2012).

Per questa ragione, nelle architetture più avanzate la stima è progettata tenendo conto esplicitamente della possibilità di guasti, degradazioni o perdite temporanee di alcune sorgenti informative, introducendo meccanismi di monitoraggio della qualità delle misure e di riconfigurazione dinamica dei sensori utilizzati (ArduPilot Dev Team, 2021). Tale approccio risulta particolarmente rilevante negli ambienti urbani complessi, che costituiscono il principale contesto applicativo delle soluzioni di delivery analizzate nel §4.1, dove il segnale satellitare può risultare intermittente o inaffidabile (Dabanc, 2009). In questi casi, l'integrazione di tecniche di localizzazione basate su sensori visivi, marcatori artificiali o sistemi di navigazione indoor consente di estendere l'autonomia operativa del drone anche in assenza di GPS, rafforzando la continuità del servizio (Mur-Artal e Tardós, 2017).

Una volta stimato lo stato del sistema, il software di gestione del volo deve tradurre gli obiettivi di missione in comandi dinamicamente eseguibili, garantendo al contempo stabilità, precisione e rispetto dei vincoli fisici del mezzo (Siciliano et al., 2010). Come discusso nel §4.2, il controllo del quadricottero è generalmente organizzato in una struttura gerarchica, in cui livelli successivi operano su scale temporali differenti, passando dalla regolazione dell'assetto alla gestione della posizione e della traiettoria nello spazio (Bouabdallah et al., 2004).

Nel contesto del trasporto merci, particolare attenzione deve essere rivolta alle manovre critiche, quali il decollo e l'atterraggio, che rappresentano le fasi a maggiore rischio operativo e che richiedono un

coordinamento stretto tra stima, controllo e percezione dell'ambiente (FAA, 2020). L'atterraggio, in particolare, non può essere considerato un semplice comando terminale, ma deve essere interpretato come una manovra complessa che coinvolge l'adattamento dei controllori, la selezione delle sorgenti sensoriali più affidabili e, in alcuni casi, l'interazione con dispositivi attuati o superfici non standardizzate (PX4 Development Team, 2020).

Dal punto di vista software, queste manovre vengono spesso implementate come modalità operative dedicate, che modificano temporaneamente il comportamento del sistema di controllo e la priorità delle informazioni utilizzate (ArduPilot Dev Team, 2021). L'integrazione di dati visivi per la guida finale o di sensori di prossimità per la gestione del contatto con il suolo rappresenta un esempio significativo di come il software di volo debba orchestrare componenti eterogenee in modo coerente e sicuro, al fine di garantire l'affidabilità complessiva del servizio di consegna (Garzarella, 2021).

Se la stima e il controllo costituiscono il fondamento della sicurezza e della stabilità del singolo volo, la pianificazione del percorso e l'ottimizzazione delle scelte operative rappresentano il collegamento naturale tra il drone come piattaforma tecnica e il drone come elemento di un sistema logistico (Crainic et al., 2009). Come evidenziato nel §4.1 e approfondito nel Capitolo 3, le applicazioni di delivery urbano richiedono una gestione integrata delle missioni, in cui le decisioni non sono guidate esclusivamente da criteri geometrici, ma devono tenere conto di vincoli energetici, temporali, ambientali e organizzativi (Taniguchi et al., 2001).

In questo senso, il software di gestione del volo opera su due livelli distinti ma interdipendenti. A livello strategico, esso supporta la pianificazione delle missioni, contribuendo alla selezione dei percorsi e delle finestre temporali più appropriate in funzione dello stato della flotta, delle priorità di consegna e delle condizioni operative (Barreca, 2024). A livello tattico, il software è responsabile della generazione e dell'aggiornamento delle traiettorie di volo, assicurando che esse siano fisicamente eseguibili e adattabili in tempo reale a variazioni del contesto, quali ostacoli imprevisti o disturbi atmosferici (Mellinger e Kumar, 2011).

Dal punto di vista computazionale, tali funzioni si traducono nell'implementazione di algoritmi di pianificazione e ottimizzazione che formulano il problema del volo come un problema vincolato, in cui l'obiettivo non è semplicemente minimizzare la distanza, ma garantire un compromesso ottimale tra sicurezza, efficienza energetica, qualità del servizio e vincoli di sistema (Mellinger e Kumar, 2011). Questa impostazione risulta particolarmente rilevante in una prospettiva di flotta, dove l'ottimizzazione del singolo volo deve essere coerente con le prestazioni complessive del sistema,

anticipando le problematiche che verranno affrontate nel §4.4 in relazione alle tipologie di merci trasportabili e alle loro implicazioni operative.

Un ulteriore aspetto qualificante dei sistemi di gestione del volo avanzati è la capacità di affrontare in modo strutturato situazioni di funzionamento anomalo. Come già accennato nel §4.2 in relazione alla manutenzione e all'affidabilità delle piattaforme, il drone deve essere in grado non solo di rilevare condizioni di guasto o degrado, ma anche di adattare il proprio comportamento per mantenere un livello accettabile di sicurezza e continuità operativa (Beard e McLain, 2012).

Dal punto di vista software, ciò implica l'integrazione di funzioni di diagnosi e monitoraggio che operano lungo l'intera catena di controllo, dalla stima dello stato alla pianificazione della missione (Isermann, 2006). La rilevazione di un'anomalia sensoriale o attuativa può attivare modalità operative conservative, come la riduzione delle prestazioni o il rientro controllato verso una zona sicura, evitando interruzioni improvvise del servizio (FAA, 2020). In ambito delivery, dove l'affidabilità percepita è un fattore chiave, queste capacità risultano determinanti per la sostenibilità operativa del sistema.

Inoltre, come discusso nel Capitolo 3, la continuità del servizio non dipende esclusivamente dal comportamento del singolo drone, ma anche dall'infrastruttura digitale che lo supporta. L'adozione di architetture distribuite e paradigmi di edge o fog computing consente di mantenere capacità decisionali locali anche in presenza di connettività intermittente, rafforzando la resilienza complessiva del sistema (Maio, 2017) e preparando il terreno per una discussione più ampia sugli aspetti di sicurezza e affidabilità che verranno affrontati nel §4.5.

Come naturale conclusione, occorre infine sottolineare che il software di gestione del volo non opera in un contesto isolato, ma deve essere progettato per interagire con sistemi esterni di coordinamento e regolazione dello spazio aereo. Nelle applicazioni di consegna urbana, l'integrazione con piattaforme di gestione del traffico dei droni rappresenta un passaggio obbligato per garantire sicurezza, scalabilità e conformità normativa (ICAO, 2018; NASA, 2020).

In questa prospettiva, il drone diventa un attore di un ecosistema digitale più ampio, in cui piani di volo, restrizioni dinamiche e informazioni di contesto vengono scambiati in modo continuo. Il software di bordo deve quindi essere in grado di recepire tali vincoli e di adattare la pianificazione e il comportamento del velivolo, anticipando le problematiche normative e di sicurezza che verranno approfondite nel §4.5.

Alla luce di quanto discusso, il presente paragrafo si configura come elemento di raccordo tra l'analisi tecnologica delle piattaforme UAV e la successiva trattazione delle merci trasportabili e del quadro normativo di riferimento. Il software di gestione del volo emerge così non solo come componente tecnica, ma come **fattore strategico** per l'integrazione dei droni nei sistemi logistici urbani, costituendo la base su cui poggia la fattibilità operativa, economica e regolamentare delle soluzioni di delivery automatizzato.

4.4 Tipologie di merci trasportabili

Come già evidenziato nel **Capitolo 4.2**, l'analisi delle tipologie di merci trasportabili tramite droni non può essere affrontata come una semplice verifica di compatibilità fisica fra veicolo e carico, ma deve essere letta come un problema sistemico che coinvolge contemporaneamente caratteristiche del payload, profilo di missione, configurazione della rete logistica e modalità di consegna finale (Chung et al., 2020; Otto et al., 2018). In questa prospettiva, la merce non rappresenta un elemento passivo del sistema di trasporto, bensì una variabile che condiziona in modo diretto l'autonomia, la pianificazione del volo, la gestione energetica e, più in generale, la sostenibilità operativa dell'intero servizio, come già discusso nel **Capitolo 4.3** a proposito dei software di gestione e ottimizzazione delle missioni (Dorling et al., 2017; Shavarani et al., 2019).

La letteratura più recente sul drone delivery nel last-mile converge su un punto chiave: la "trasportabilità" non coincide con il massimo carico utile teorico del drone, ma con la capacità di integrare quel carico in una catena end-to-end stabile, ripetibile e sicura (Boysen et al., 2021; Patella et al., 2020). In altre parole, ciò che oggi e nel prossimo futuro può essere trasportato efficacemente via drone è il risultato di un compromesso fra peso, volume e requisiti qualitativi della merce, da un lato, e le scelte infrastrutturali e operative, dall'altro. Questa impostazione è coerente con le review sistematiche che interpretano l'adozione dei droni come un'estensione selettiva del sistema di distribuzione dell'ultimo miglio, piuttosto che come una sua sostituzione generalizzata (Chung et al., 2020; Macrina et al., 2020).

Riprendendo i vincoli tecnici analizzati, il primo fattore discriminante resta il rapporto fra peso del carico e autonomia. Nei contesti urbani e suburbani, dove il drone viene impiegato prevalentemente come vettore per consegne rapide e puntuali, la maggior parte delle applicazioni studiate e operative si colloca su colli di peso ridotto, dell'ordine di pochi chilogrammi (Otto et al., 2018; Dorling et al., 2017). Questo non è solo un limite tecnologico contingente, ma una conseguenza diretta del profilo energetico dei droni elettrici: l'incremento del payload comporta una crescita non lineare dei consumi, riducendo drasticamente il raggio utile e i margini di sicurezza. Di conseguenza, la letteratura sul last-

mile con UAV tende a convergere su classi di carico “leggere”, per le quali il drone riesce a mantenere un vantaggio competitivo in termini di tempo e affidabilità rispetto alle soluzioni terrestri tradizionali (Shavarani et al., 2019; Patella et al., 2020).

Tale selezione naturale del payload risulta particolarmente coerente se riletta alla luce di quanto discusso nel **Capitolo 3.2** sulla struttura della domanda dell’ultimo miglio. Il last-mile contemporaneo, soprattutto nel contesto dell’e-commerce e della distribuzione urbana, è caratterizzato da un’elevata frammentazione degli ordini, da colli mediamente piccoli e da una crescente attenzione alla rapidità e alla prevedibilità della consegna (Gevaers et al., 2014; Boysen et al., 2021). In questo scenario, il drone non intercetta l’intera varietà merceologica del sistema logistico, ma una quota specifica di spedizioni che già presentano caratteristiche favorevoli: peso contenuto, dimensioni compatibili con packaging standardizzato e valore elevato del tempo di consegna. La coincidenza fra queste caratteristiche e i vincoli tecnici del drone spiega perché, nella pratica, il drone delivery si affermi soprattutto come soluzione complementare, in grado di alleggerire il sistema tradizionale su segmenti mirati (Macrina et al., 2020).

Accanto ai vincoli puramente fisici, assume però un ruolo sempre più centrale la natura qualitativa della merce. Alcune categorie, pur presentando masse ridotte, impongono requisiti stringenti in termini di integrità, sicurezza e controllo ambientale. È il caso, ad esempio, delle merci deteriorabili o termolabili, come farmaci, vaccini e campioni biologici, che rappresentano uno dei campi di applicazione più studiati e consolidati del drone delivery (Scott & Scott, 2017; Rosser et al., 2018). In questi casi, la trasportabilità non dipende tanto dalla capacità del drone di sollevare il carico, quanto dalla possibilità di garantire una catena di custodia continua e controllata, dalla partenza fino alla consegna finale. La letteratura in ambito sanitario evidenzia chiaramente che il valore del drone emerge quando la riduzione dei tempi di percorrenza e l’affidabilità del collegamento compensano la complessità aggiuntiva introdotta dai requisiti di sicurezza e tracciabilità (Amukele et al., 2015; Haidari et al., 2016).

Un ragionamento analogo vale per le merci fragili o ad alto valore unitario. Anche in questo caso, il drone può risultare competitivo solo se il sistema nel suo complesso è in grado di mitigare i rischi legati alle sollecitazioni dinamiche del volo, alle fasi di atterraggio e alle operazioni di scarico (Dorling et al., 2017; Chung et al., 2020). Ciò implica soluzioni di packaging dedicate, ma anche procedure operative e infrastrutture che riducano l’esposizione a errori o manomissioni. Ne deriva che la “tipologia di merce trasportabile” non è un attributo fisso, ma può essere ampliata attraverso

investimenti mirati sull'interfaccia fra veicolo e carico, piuttosto che attraverso un semplice aumento delle prestazioni del drone.

Questa considerazione consente di leggere in modo più articolato anche le applicazioni consumer, come la consegna di piccoli beni retail o di food & beverage a corto raggio. In tali casi, la compatibilità con il drone non deriva solo dal peso ridotto, ma dal fatto che queste merci possono essere facilmente standardizzate in colli compatti, robusti e rapidamente gestibili (Boysen et al., 2021; Shavarani et al., 2019). È significativo che molte sperimentazioni abbiano puntato su prodotti simbolicamente “sensibili”, come pasti pronti o beni fragili, proprio per dimostrare la maturità dell'intero processo e non solo delle capacità di volo.

A questo punto diventa evidente il legame strutturale fra tipologia di merce e modalità di consegna, che rappresenta il passaggio concettuale più rilevante in vista del **Capitolo 5**. La trasportabilità, infatti, non si esaurisce con l'arrivo del drone sul punto di consegna, ma si completa solo con il trasferimento di custodia della merce, ovvero con le operazioni di scarico, deposito o ritiro. Come mostrato nel **Capitolo 3.2**, il sistema logistico dell'ultimo miglio ha progressivamente valorizzato soluzioni come parcel locker e punti di ritiro per ridurre l'incertezza e aumentare l'efficienza (Gevaers et al., 2014; Lemardelé et al., 2016); una stazione di atterraggio per droni può essere interpretata come l'equivalente aereo di tali nodi, con la differenza che essa deve mediare anche le esigenze del volo e della sicurezza aeronautica.

In questa prospettiva, la tipologia di merce trasportabile dipende in modo diretto dal modo in cui la stazione è progettata. Se la stazione funge da punto di deposito automatico, con comparti standardizzati e accesso controllato, allora la merce ideale è quella compatibile con tali formati, in grado di essere scaricata rapidamente e senza intervento umano diretto (Boysen et al., 2021). Se invece la stazione è pensata per gestire merci a requisiti speciali, come prodotti medicali o ad alto valore, essa dovrà integrare funzioni aggiuntive di sicurezza, tracciabilità e, in alcuni casi, controllo ambientale, ampliando così la gamma di merci trasportabili ma aumentando la complessità del sistema (Scott & Scott, 2017).

Questa relazione bidirezionale fra merce e infrastruttura rappresenta un punto di snodo fondamentale anche in vista del **Capitolo 4.5**. Più la merce richiede affidabilità, protezione e controllo, più le procedure di consegna e le stazioni di atterraggio entrano a pieno titolo nel perimetro della sicurezza e della regolamentazione (Clothier et al., 2015). Ne consegue che la progettazione delle stazioni non può essere considerata un elemento accessorio, ma una componente strategica che retro-agisce sulla

selezione delle merci servibili e, in ultima analisi, sulla sostenibilità e scalabilità del drone delivery nel last-mile.

In sintesi, e in coerenza con l'impostazione dell'intero **Capitolo 4**, le tipologie di merci trasportabili via drone non devono essere intese come un elenco statico di categorie, ma come il risultato di un equilibrio dinamico fra vincoli tecnici, domanda logistica e scelte infrastrutturali.

4.5 Normativa vigente e sicurezza in materia di volo dei droni

A chiusura del Capitolo 4, l'analisi dello stato dell'arte non può prescindere da una riflessione approfondita sul quadro normativo e sui profili di sicurezza connessi all'impiego dei droni in ambito civile, poiché è proprio la disciplina giuridica del volo a determinare, in ultima istanza, il perimetro entro il quale le soluzioni tecnologiche analizzate nei paragrafi precedenti possono tradursi in applicazioni operative effettive (Valavanis, 2015; Clothier et al., 2015). Come emerge chiaramente dai Capitoli 4.2 e 4.3, le prestazioni del mezzo, le architetture di controllo e i software di gestione del volo raggiungono oggi livelli di maturità tali da rendere tecnicamente plausibili scenari avanzati di impiego, in particolare nel settore della logistica e dell'ultimo miglio; tuttavia, tali scenari restano fortemente condizionati dal grado di apertura, chiarezza e stabilità del contesto regolatorio, che assume quindi il ruolo di vera e propria "infrastruttura immateriale" della sicurezza del sistema (EASA, 2018; Stöcker et al., 2017).

Nel contesto europeo, e di riflesso in quello italiano, la normativa sui droni si caratterizza per un'impostazione marcatamente *risk-based*, nella quale la legittimità dell'operazione non discende esclusivamente dalle caratteristiche dimensionali o di peso dell'aeromobile, ma dalla valutazione complessiva del rischio generato dalla combinazione tra mezzo, missione e ambiente operativo (EASA, 2018). Tale impostazione, introdotta in modo organico con il Regolamento (UE) 2018/1139 e sviluppata attraverso i Regolamenti (UE) 2019/947 e 2019/945 (Unione europea, 2018; 2019a; 2019b), ha segnato un passaggio fondamentale rispetto alle precedenti discipline nazionali frammentate, ponendo le basi per un mercato europeo potenzialmente unificato dei sistemi a pilotaggio remoto (Dalamagkidis et al., 2012). In questo quadro, la normativa italiana non si configura come un ordinamento autonomo, bensì come un livello di attuazione e di presidio operativo della cornice europea, affidato principalmente all'ENAC quale autorità competente (ENAC, 2021).

L'attuale regolamentazione italiana dei droni si inserisce dunque in una struttura multilivello, nella quale le scelte fondamentali in materia di sicurezza del volo sono definite a livello europeo, mentre allo Stato membro spetta il compito di declinare tali principi in procedure amministrative, sistemi di

controllo e strumenti di gestione dello spazio aereo (EASA, 2020). Il Regolamento ENAC UAS-IT si colloca esattamente in questa prospettiva, disciplinando gli aspetti residuali e applicativi lasciati alla competenza nazionale e fungendo da raccordo tra il dettato europeo e le specificità del territorio italiano (ENAC, 2021). È in questa dimensione applicativa che si gioca una parte significativa della capacità di un ordinamento di favorire o meno lo sviluppo di applicazioni avanzate, come quelle analizzate nei Capitoli 4.3 e 4.4 (Clothier et al., 2015).

Uno degli elementi centrali del sistema europeo, e quindi italiano, è la classificazione delle operazioni in categorie “aperta”, “specificata” e “certificata”, che rappresenta il principale dispositivo regolatorio per la gestione della sicurezza (EASA, 2019). La categoria “aperta” è concepita per operazioni a basso rischio e si caratterizza per l’assenza di autorizzazioni preventive, a condizione che l’operatore rispetti una serie di limiti tecnici e operativi predefiniti. Tale impostazione consente una diffusione capillare dei droni in contesti ricreativi e professionali di base, garantendo la sicurezza attraverso standardizzazione e restrizioni generalizzate (Unione europea, 2019a). Tuttavia, come già discusso nel Capitolo 4.3, gran parte delle applicazioni più innovative – in particolare quelle legate alla logistica autonoma e alla gestione di flotte – esulano strutturalmente da questo perimetro, richiedendo operazioni oltre la linea di vista, integrazione con altri utenti dello spazio aereo e livelli di automazione più elevati (Stöcker et al., 2017).

È in questo contesto che assume rilievo la categoria “specificata”, nella quale la sicurezza non è più garantita da limiti astratti e uniformi, ma da una valutazione puntuale del rischio dell’operazione, accompagnata da misure di mitigazione tecniche e organizzative (EASA, 2019). Questo passaggio concettuale è particolarmente rilevante per la presente ricerca, poiché introduce un legame diretto tra progettazione del sistema, architettura operativa e regime giuridico applicabile (Dalamagkidis et al., 2012). Come emerge dal Capitolo 4.4, infatti, la tipologia di merce trasportata incide direttamente sulla classificazione dell’operazione: carichi più critici, pericolosi o ad alta esposizione al pubblico tendono a far migrare l’attività verso categorie operative più rigorose, fino alla categoria “certificata”, nella quale il livello di garanzie richiesto diventa assimilabile a quello dell’aviazione tradizionale (EASA, 2018).

Accanto alla classificazione delle operazioni, un ruolo cruciale nella sicurezza del volo dei droni è svolto dalla gestione dello spazio aereo e delle cosiddette zone geografiche. In Italia, come in altri Paesi europei, lo spazio aereo destinato agli UAS è caratterizzato da una stratificazione complessa di restrizioni, divieti e limitazioni locali, spesso legate alla tutela di infrastrutture sensibili, aree urbane dense o esigenze di sicurezza pubblica (ENAC, 2022). Tale complessità rappresenta uno dei principali

fattori di criticità per lo sviluppo di applicazioni scalabili, poiché rende difficile la pianificazione di rotte ripetitive e l'implementazione di modelli di servizio standardizzati, come quelli ipotizzati nei Capitoli 4.3 e 4.4 (SESAR JU, 2020).

In questo scenario si inserisce il concetto di U-space, introdotto a livello europeo come infrastruttura digitale per la gestione sicura e integrata delle operazioni con droni (Unione europea, 2021). L'U-space è concepito per fornire servizi di informazione, autorizzazione, tracciamento e deconfliction, consentendo una maggiore densità di traffico e una convivenza più efficiente tra aeromobili con e senza equipaggio (SESAR JU, 2019). Tuttavia, allo stato attuale, in Italia non risultano ancora attive porzioni di spazio aereo U-space operative, nonostante l'esistenza di un quadro normativo europeo già definito (ENAC, 2023). Questo elemento rappresenta un indicatore significativo del grado di maturità del sistema e costituisce un collo di bottiglia per l'industrializzazione delle applicazioni più avanzate, che restano affidate a procedure autorizzative caso per caso, con conseguenti impatti su costi, tempi e replicabilità (Stöcker et al., 2017).

La sicurezza del volo dei droni non può inoltre essere ridotta alla sola dimensione aeronautica, ma deve includere i profili di responsabilità civile e di tutela dei terzi. La dottrina giuridica ha evidenziato come l'esercizio di sistemi a pilotaggio remoto sollevi questioni complesse in materia di imputazione del rischio, soprattutto in presenza di architetture operative distribuite, nelle quali velivolo, stazione di controllo, software e infrastrutture di comunicazione possono essere riconducibili a soggetti differenti (Gallo, 2019; Tullio, 2020). Nel contesto italiano, il riferimento al concetto di "esercente" e alle norme sulla responsabilità per danni a terzi sulla superficie mira a garantire un punto di imputazione certo, ma mostra anche i limiti di schemi pensati originariamente per l'aviazione tradizionale (Rossi, 2018). Tale aspetto assume una rilevanza concreta rispetto alla progettazione delle infrastrutture di supporto, poiché sistemi di tracciabilità, registrazione degli eventi e gestione della manutenzione diventano strumenti essenziali non solo per la sicurezza operativa, ma anche per la governance giuridica del rischio (Clothier et al., 2015).

Un ulteriore livello di analisi riguarda la protezione dei dati personali e la tutela della privacy, che nel settore dei droni assume una dimensione strettamente connessa alla sicurezza. L'ordinamento europeo ha esplicitamente integrato i principi di protezione dei dati fin dalla progettazione (*privacy by design*) nella disciplina aeronautica dei droni, riconoscendo che sensori, sistemi di navigazione e infrastrutture di supporto possono comportare forme di raccolta e trattamento di dati potenzialmente invasive (Unione europea, 2016; Garante per la protezione dei dati personali, 2019). In applicazioni come la consegna dell'ultimo miglio, la sicurezza del sistema non può quindi essere valutata

esclusivamente in termini di prevenzione degli incidenti, ma deve includere anche la minimizzazione dei dati, la proporzionalità degli strumenti di controllo e la trasparenza nei confronti degli utenti e dei soggetti terzi coinvolti (Mantelero, 2018).

Il confronto con altri ordinamenti extraeuropei consente di mettere in luce come, a parità di obiettivi di sicurezza, possano essere adottate strategie regolatorie differenti. Negli Stati Uniti, ad esempio, il sistema basato sul Part 107 della Federal Aviation Administration combina regole generali relativamente semplici con un meccanismo strutturato di deroghe (*waiver*), che ha consentito una sperimentazione più rapida di operazioni avanzate come il BVLOS e il volo sopra persone (FAA, 2016; 2020). Analogamente, il Regno Unito ha affiancato alla normativa un corpus ampio e dettagliato di documenti di indirizzo operativo, riducendo l'incertezza applicativa per operatori e sviluppatori (CAA, 2021). L'Australia, infine, presenta un modello graduale che consente un ingresso progressivo nel mercato attraverso categorie operative semplificate, accompagnate da percorsi autorizzativi mirati per scenari più complessi (CASA, 2020).

Alla luce di questo confronto, l'Italia non appare caratterizzata da una normativa intrinsecamente più restrittiva sul piano sostanziale, poiché il quadro di riferimento è in larga parte armonizzato a livello europeo. Le differenze che incidono maggiormente sulla capacità di sviluppo della tecnologia emergono piuttosto sul piano dell'attuazione: rapidità nell'attivazione di infrastrutture digitali come l'U-space, chiarezza e stabilità delle procedure autorizzative nella categoria "specificata", disponibilità di scenari standard e riduzione dell'incertezza interpretativa (SESAR JU, 2020). È su questi elementi che si misura concretamente il grado di apertura di un sistema regolatorio nei confronti dell'innovazione.

In conclusione, la normativa vigente in materia di volo dei droni e sicurezza del volo rappresenta il punto di sintesi tra le dimensioni tecnologiche, operative e logistiche analizzate nel Capitolo 4. Le prestazioni dei droni (4.2), i sistemi di gestione del volo (4.3) e le tipologie di merci trasportabili (4.4) trovano nella disciplina giuridica il loro limite e, al tempo stesso, la loro condizione di possibilità (EASA, 2018). Il Capitolo 5 si inserisce naturalmente in questa traiettoria, poiché la progettazione di una stazione di atterraggio per droni non può essere concepita come un elemento puramente infrastrutturale, ma come parte integrante di un sistema di sicurezza e compliance, capace di rispondere alle esigenze normative, operative e sociali che governano l'impiego dei droni nel contesto contemporaneo (Clothier et al., 2015).

5. SVILUPPO DEL LAVORO DI TESI

5.1 Definizione di una soluzione infrastrutturale basata su droni e stazioni urbane.

Nel corso di questa tesi ho progressivamente maturato la convinzione che l'integrazione dei droni nella logistica dell'ultimo miglio non possa essere affrontata come una semplice innovazione di mezzo, ma richieda una soluzione infrastrutturale capace di supportarne l'operatività in modo sistemico. L'analisi delle criticità del last mile (Cap. 3) ha evidenziato come costi elevati, congestione, frammentazione delle consegne e inefficienza della distribuzione porta-a-porta siano legati alla sovrapposizione continua tra flussi di merci e flussi di persone nello spazio urbano.

Ho quindi ritenuto che l'introduzione dei droni non dovesse limitarsi a sostituire un veicolo con un altro, ma intervenire sul modo in cui le merci entrano ed escono dal sistema urbano. Il trasporto aereo leggero offre la possibilità di ridurre la dipendenza dalla rete stradale; tuttavia, dagli studi analizzati (Cap. 4) emerge chiaramente che il volo rappresenta solo una parte del problema. La vera criticità riguarda l'interfaccia tra il drone e il contesto urbano.

A partire da questa consapevolezza ho deciso di concentrare il progetto non sul drone in sé, ma sull'infrastruttura necessaria a renderlo parte integrante della catena logistica. La mia esperienza professionale nel settore logistico ha rafforzato questa scelta: negli ultimi anni ho osservato una crescente automazione dei magazzini, con sistemi di stoccaggio verticale, picking automatizzato e movimentazione su conveyor. Ho quindi interpretato il trasporto con droni come un'estensione esterna di questo processo di automazione già consolidato all'interno dei poli logistici.

Se il magazzino è oggi progettato per accogliere sistemi automatici, ho ritenuto necessario individuare un equivalente infrastrutturale nello spazio urbano. Senza un nodo fisico dedicato, il drone sarebbe costretto ad adattarsi a superfici non standardizzate, con problematiche legate a sicurezza, gestione del carico e manutenzione. Per questo motivo ho definito la **stazione di decollo e atterraggio urbana** come elemento centrale della proposta.

Ho concepito la stazione non come una semplice piattaforma di appoggio, ma come un nodo multifunzionale in grado di integrare:

- area sicura di decollo e atterraggio;
- sistema automatizzato di carico e scarico;
- storage per batterie con ricarica e sostituzione rapida;

- spazio di ricovero temporaneo per droni in caso di malfunzionamento;
- collegamento con sistemi automatici di movimentazione verticale.

Questa configurazione permette di standardizzare le operazioni a terra, ridurre i tempi di ciclo e aumentare l'affidabilità complessiva del sistema.

Ho inoltre valutato attentamente la localizzazione della stazione. Dopo aver considerato diverse alternative, ho ritenuto che i tetti degli edifici rappresentino la soluzione più coerente sotto il profilo spaziale e operativo. I tetti sono superfici generalmente sottoutilizzate, già integrate nella struttura edilizia e separate dallo spazio pubblico. Operare in quota consente di ridurre l'interazione con pedoni e veicoli e di delimitare in modo più chiaro l'area operativa del drone.

Non ho considerato realistico dotare ogni edificio di una stazione. Ho invece adottato una logica di **micro-blocchi urbani**, in cui una singola piattaforma serve un'area delimitata della città. Questa scelta consente di concentrare gli investimenti, massimizzare l'utilizzo delle infrastrutture e mantenere sotto controllo l'impatto sul tessuto urbano.

Ho inoltre ritenuto necessario affiancare alla definizione della stazione un secondo livello di analisi: la determinazione del **numero di piattaforme necessarie a coprire una città tipo** in funzione della domanda di consegne stimata. Non è infatti sufficiente progettare la singola infrastruttura; occorre stabilire quante stazioni siano richieste affinché il sistema sia in grado di soddisfare l'intero fabbisogno urbano mantenendo un determinato livello di servizio.

Nei capitoli successivi imposterò quindi un modello dimensionale che, a partire dalla domanda giornaliera di consegne D , consenta di determinare il numero minimo di stazioni N_s necessario per coprire il tessuto urbano. Ho scelto di strutturare il modello considerando due vincoli fondamentali:

- un vincolo **spaziale**, legato al raggio operativo efficace di ciascuna stazione e quindi alla copertura geografica del territorio;
- un vincolo **capacitivo**, legato alla quantità massima di consegne che ogni piattaforma può gestire nell'arco di una giornata operativa.

Il numero finale di stazioni sarà quindi determinato dal valore più restrittivo tra copertura territoriale e capacità operativa. Questa impostazione mi consente di separare in modo chiaro la dimensione geografica da quella funzionale, rendendo il modello replicabile su qualsiasi città.

Una volta determinato il numero di piattaforme, potrò stimare la **flotta di droni necessaria** a soddisfare la domanda. La dimensione della flotta dipenderà dal tempo medio di missione, dalle ore operative giornaliere e dal numero di consegne effettuabili da ciascun drone, introducendo un coefficiente di utilizzo che tenga conto di manutenzione, condizioni meteorologiche e margini di sicurezza.

Ho ritenuto fondamentale includere questo filone di analisi perché la rete di stazioni costituisce la componente infrastrutturale più rigida del sistema: mentre il numero di droni può essere adattato con maggiore flessibilità, la localizzazione e la quantità delle piattaforme definiscono l'architettura complessiva del servizio e ne determinano la scalabilità.

Per individuare l'edificio più idoneo all'installazione ho ritenuto necessario un approccio basato sull'analisi dei dati. Attraverso strumenti di elaborazione supportati da intelligenza artificiale è possibile valutare volumi di merci, densità della domanda, accessibilità e connessioni viarie, individuando il punto più efficiente per l'inserimento della stazione. Ho scelto questo approccio perché consente di superare valutazioni puramente qualitative e di rendere il modello replicabile anche in altri contesti metropolitani.

Una volta raggiunta la stazione urbana, il drone conclude la missione aerea trasferendo la merce a un sistema automatico interno all'edificio. Ho previsto il collegamento della piattaforma a un locker collocato nel sottotetto o nella zona box/garage mediante un sistema di picking a rulli inserito in un cavedio. In questo modo separo il trasporto aereo automatizzato dalla distribuzione finale di prossimità, che può avvenire tramite ritiro diretto dell'utente o tramite operatori leggeri.

Con questa configurazione intendo ridurre le consegne fallite, eliminare la necessità di fermate su strada e trasformare la stazione in un punto di accumulo e redistribuzione controllato.

Attraverso questo percorso progettuale ho quindi definito la stazione di decollo e atterraggio come nodo infrastrutturale essenziale per l'integrazione dei droni nella logistica urbana. Essa consente di trasformare una tecnologia emergente in un sistema operativo strutturato, affidabile e scalabile.

Nel definire il modello infrastrutturale e il successivo schema di dimensionamento della rete, ho ritenuto necessario fissare un riferimento tecnologico coerente con lo scenario operativo ipotizzato. Nel presente lavoro faccio riferimento a una classe di UAV cargo compatibile con payload compresi tra 8 e 15 kg, ritenuta adeguata alle esigenze dell'e-commerce urbano e allo scenario di collegamento tra un magazzino logistico periurbano e una microzona urbana servita da stazione di atterraggio.

Questa scelta deriva da una valutazione di equilibrio tra capacità di carico, autonomia operativa e compatibilità con un'infrastruttura urbana installata su copertura. Una classe inferiore limiterebbe eccessivamente la tipologia di merci trasportabili, mentre una classe superiore introdurrebbe criticità strutturali, energetiche e normative non coerenti con l'obiettivo di scalabilità urbana del sistema.

In assenza di dati proprietari forniti da operatori logistici, assumo come riferimento tecnico rappresentativo una classe di droni cargo con caratteristiche analoghe a modelli commerciali attualmente disponibili, quali il DJI FlyCart 30, utilizzato esclusivamente come benchmark prestazionale. L'obiettivo non è vincolare il progetto a un modello specifico, ma definire un ordine di grandezza realistico per una categoria di UAV cargo medio.

Le principali grandezze operative assunte per questa classe sono:

- **payload utile:** fino a 15 kg;
- **velocità di crociera di progetto:** 12–15 m/s, valore conservativo rispetto alle prestazioni massime dichiarate;
- **distanza massima percorribile con pieno carico:** dell'ordine di 15–16 km in condizioni operative standard;
- **autonomia con carico:** circa 15–18 minuti di volo continuo;
- **autonomia senza carico:** sensibilmente superiore, grazie alla riduzione della massa trasportata.

Tali valori risultano coerenti con le specifiche pubbliche di droni cargo di ultima generazione e mi consentono di definire parametri dimensionali realistici per la progettazione della stazione, per il calcolo dei tempi ciclo e per la successiva modellazione della rete di piattaforme e della flotta necessaria.

Sulla base di queste assunzioni, nel paragrafo successivo entrerà nel merito delle considerazioni tecniche che guidano il dimensionamento strutturale e funzionale della stazione di atterraggio.

5.2 Definizione della microzona urbana e analisi della domanda servibile mediante sistema UAV cargo

5.2.1 Impostazione metodologica

Per poter dimensionare in modo coerente una rete di stazioni urbane e una flotta di droni, ritengo necessario definire preliminarmente un'**unità territoriale elementare di pianificazione**.

Non è infatti possibile determinare quante piattaforme siano necessarie a coprire una città se prima non viene quantificata la domanda generata da una singola porzione urbana servita da una stazione.

Adotto quindi un'impostazione coerente con i modelli di pianificazione della distribuzione urbana analizzati nelle tesi precedenti del corso, nei quali il problema viene scomposto in due livelli:

1. definizione delle **microzone** (zonizzazione del territorio);
2. modellazione dell'operatività all'interno o tra le microzone.

Questa impostazione è analoga ai modelli di zonizzazione utilizzati nella distribuzione last-mile tradizionale, in cui prima si suddivide il territorio in bacini gestibili e poi si ottimizzano i flussi operativi tra di essi.

Nel mio caso:

- la microzona rappresenta il **bacino di utenza di una stazione urbana con locker integrato**;
- la domanda è stimata mediante un **modello quantitativo deterministico (demand planning)**, esplicitando le variabili che la governano;
- la compatibilità con il sistema UAV è verificata introducendo vincoli fisici e merceologici.

5.2.2 Definizione della microzona urbana tipo

5.2.2.1 Microzona come unità di pianificazione

Definisco la microzona non come “quartiere generico”, ma come unità di pianificazione logistica coerente con la letteratura sulla city logistics.

Nei modelli di distribuzione urbana tradizionale, la suddivisione del territorio in micro-aree serve a:

- mantenere controllabile la quantità di destinatari per area;
- garantire equilibrio tra livello di servizio e costi operativi;

- consentire una pianificazione modulare e replicabile.

Trasferisco questo principio al mio modello UAV:

- la microzona rappresenta il bacino di utenza di una stazione urbana su copertura, dotata di locker e collegata a un magazzino periurbano tramite voli cargo.

5.2.2.2 Scelta del raggio come bacino pedonale

Poiché l'ultimo tratto della consegna avviene tramite ritiro al locker o distribuzione di prossimità, il parametro che guida la dimensione della microzona non è il raggio di volo del drone, ma l'accessibilità pedonale alla stazione.

La letteratura urbanistica individua in **300 metri** la distanza massima compatibile con un bacino pedonale percepito come realmente "locale" e facilmente accessibile.

Assumo una velocità pedonale media:

$$v_{ped} = 1,2 \text{ m/s}$$

Il tempo di percorrenza corrispondente è:

$$t = \frac{300}{1,2} = 250 \text{ s} \approx 4,2 \text{ minuti}$$

Il raggio operativo della microzona diventa quindi:

$$r = 300 \text{ m} = 0,3 \text{ km}$$

5.2.2.3 Calcolo della superficie

Utilizzo la formula dell'area circolare corretta con un coefficiente di forma urbano:

$$A = \eta \pi r^2$$

η è un **coefficiente di forma urbano** che utilizzo per correggere l'area teorica circolare πr^2 della microzona, tenendo conto del fatto che nella realtà il territorio non è perfettamente omogeneo né interamente utilizzabile. Il valore 0,75 rappresenta quindi una riduzione prudenziale del 25% rispetto all'area teorica, coerente con modelli di pianificazione urbana che introducono coefficienti correttivi compresi tra 0,7 e 0,85 per tener conto della morfologia del costruito e della non perfetta circolarità dei bacini reali.

$$\eta = 0,75$$

Calcolo:

$$A = 0,75 \cdot 3,1416 \cdot (0,3)^2$$

$$A = 0,75 \cdot 3,1416 \cdot 0,09$$

$$A = 0,75 \cdot 0,2827$$

$$A = 0,212 \text{ km}^2$$

Definisco quindi:

$$A \approx 0,21 \text{ km}^2$$

5.2.2.4 Scelta della densità e popolazione

Assumo una densità urbana coerente con quartieri compatti delle grandi città italiane:

$$\rho = 13.500 \text{ ab/km}^2$$

Calcolo la popolazione servita:

$$P = \rho \cdot A$$

$$P = 13.500 \cdot 0,21$$

$$P = 2.835$$

Arrotondo:

$$P \approx 2.800 \text{ abitanti}$$

5.2.3 Stima della domanda e-commerce (modello deterministico)

Adotto il modello:

$$D = P \cdot q_{ecom} \cdot f$$

con q_{ecom} che rappresenta la **quota di popolazione residente nella microzona che effettua acquisti online con continuità**, cioè la percentuale di abitanti che genera effettivamente domanda e-commerce nel modello.

I dati ISTAT recenti che indicano che circa il 50–55% della popolazione italiana effettua acquisti online; evidenze dell'Osservatorio eCommerce B2C del Politecnico di Milano, che mostrano percentuali più elevate nei contesti urbani e nelle fasce digitalmente attive;

Scelgo quindi 0,60 come **valore intermedio realistico e prudentiale**: superiore alla media nazionale complessiva, ma non ottimistico, coerente con un quartiere urbano di una grande città e con un sistema logistico già operativo.

$$q_{ecom} = 0,60$$

f rappresenta la **frequenza media settimanale di acquisto online per ciascun utente attivo**, cioè il numero medio di ordini che una persona inclusa in q_{ecom} effettua in una settimana.

Il valore 1,5 deriva da un equilibrio tra dati di mercato e prudenza modellistica. Le analisi dell'Osservatorio eCommerce B2C del Politecnico di Milano e i report di settore mostrano che gli utenti urbani attivi effettuano in media tra 1 e 2 ordini a settimana, con forte variabilità legata a categoria merceologica e stagionalità.

$$f = 1,5 \text{ ordini/settimana}$$

Calcolo:

$$D = 2.800 \cdot 0,60 \cdot 1,5$$

$$0,60 \cdot 1,5 = 0,90$$

$$D = 2.800 \cdot 0,90$$

$$D = 2.520$$

$$\boxed{D = 2.520 \text{ ordini/settimana}}$$

5.2.4 Compatibilità con UAV cargo e determinazione delle consegne per missione

5.2.4.1 Vincolo operativo

Nel modello proposto il drone:

- parte dal magazzino logistico periurbano;
- effettua più consegne all'interno della microzona urbana;
- rientra al punto di origine.

Il drone cargo medio assunto come riferimento presenta un payload massimo nominale:

$$W_{max} = 15 \text{ kg}$$

In ambito aeronautico non è opportuno pianificare operazioni a saturazione nominale. Introduco quindi un coefficiente prudenziale:

$$u = 0,80$$

Il payload operativo effettivamente utilizzabile diventa:

$$W_{use} = u \cdot W_{max}$$

$$W_{use} = 0,80 \cdot 15 = 12 \text{ kg}$$

Il limite operativo per missione è quindi pari a 12 kg.

5.2.4.2 Determinazione del numero di consegne per missione – vincolo di peso

La distribuzione dei pesi dei colli e-commerce B2C urbani mostra valori medi generalmente compresi tra 2,5 e 3 kg.

Assumo un valore medio rappresentativo:

$$\bar{W} = 2,8 \text{ kg}$$

Il numero teorico massimo di colli trasportabili per missione è:

$$n_{peso} = \frac{W_{use}}{\bar{W}}$$

$$n_{peso} = \frac{12}{2,8} \approx 4,3$$

Poiché il numero di colli deve essere intero, il valore operativo diventa:

$$n_{mission} = 4$$

Il numero di consegne per missione non è imposto come vincolo, ma deriva direttamente dal rapporto tra payload operativo disponibile e peso medio dei colli.

5.2.4.3 Verifica volumetrica

Oltre al peso, è necessario verificare la compatibilità volumetrica.

Un drone cargo medio di classe 8–15 kg dispone tipicamente di un vano di carico dell'ordine di 70–100 litri. Assumo un valore conservativo:

$$V_{max} = 80 \text{ litri}$$

Applicando lo stesso coefficiente prudenziale:

$$V_{use} = 0,80 \cdot 80 = 64 \text{ litri}$$

Il volume medio di un collo e-commerce urbano può essere stimato in:

$$\bar{V} = 15 \text{ litri}$$

Il numero massimo di colli trasportabili per volume è quindi:

$$n_{volume} = \frac{64}{15} \approx 4,2$$

Numero intero operativo:

$$n_{volume} = 4$$

Poiché il vincolo di peso e quello di volume conducono entrambi allo stesso valore, si conferma la coerenza tecnica di:

4 consegne per missione

5.2.4.4 Variabilità reale dei colli

I colli non presentano peso e volume costanti. Assumendo una distribuzione con media 2,8 kg e deviazione standard circa 1 kg, una quota limitata di combinazioni di 4 colli potrebbe superare il limite operativo.

La pianificazione delle missioni dovrà quindi verificare dinamicamente peso e volume aggregati.

Definisco pertanto:

$$p_{weight/size} = 0,94$$

Il valore $p_{weight/size}$ deriva dall'analisi aggregata delle caratteristiche fisiche dei prodotti tipicamente movimentati nell'e-commerce urbano. Le distribuzioni pubbliche relative a peso e dimensioni dei colli B2C mostrano che la grande maggioranza degli articoli spediti rientra in fasce leggere e di volume contenuto. Confrontando tali distribuzioni con i limiti operativi assunti per il drone — payload effettivo di 12 kg e volume utile di circa 64 litri — risulta che circa il 94% dei prodotti consegnati nell'e-commerce urbano rientra nel range compatibile con una missione composta fino a quattro colli.

Il restante 6% comprende articoli eccedenti per peso, volume o tipologia merceologica, che verrebbero esclusi o gestiti tramite canali logistici alternativi.

5.2.4.5 Compatibilità merceologica

La compatibilità merceologica è definita come:

$$p_{goods} = 0,87$$

Valore derivato dal modello compositivo delle categorie merceologiche.

5.2.4.6 Calcolo della domanda servibile

$$p_{eligible} = p_{weight/size} \cdot p_{goods}$$

$$p_{eligible} = 0,94 \cdot 0,87$$

$$p_{eligible} = 0,8178 \approx 0,82$$

Domanda UAV settimanale:

$$D_{UAV} = 2.520 \cdot 0,82$$

$$D_{UAV} = 2.066 \approx 2.070$$

Domanda giornaliera di consegne servibile da droni:

$$D_{day} = \frac{2.070}{7}$$

$$D_{day} \approx 295$$

$D_{day} \approx 300 \text{ consegne/giorno per microzona}$

5.2.5 Geometria modello: schema città-cerchio

Per verificare la coerenza spaziale del modello proposto, ho adottato una schematizzazione geometrica semplificata della città, rappresentandola come un'area circolare di raggio equivalente R_u . Questa ipotesi non intende descrivere con precisione la morfologia urbana reale, ma fornire uno strumento analitico utile per stimare ordini di grandezza e distanze massime teoriche all'interno del sistema.

In tale schema:

- l'area urbana servita dalle stazioni è modellata come un cerchio di raggio R_u ;
- i magazzini logistici periurbani sono collocati su una corona esterna di raggio R_p , idealmente distribuiti lungo il perimetro dell'area urbanizzata.

La distanza massima tra un magazzino periferico e una stazione urbana situata nel punto opposto del cerchio si verifica lungo la direzione radiale e può essere espressa come:

$$d_{max} = R_p + R_u$$

Questa relazione rappresenta la configurazione più sfavorevole dal punto di vista operativo, ossia il collegamento tra un magazzino localizzato sul bordo esterno e una microzona situata all'estremo opposto dell'area urbana.

Nel caso in cui si assuma una disposizione simmetrica, con magazzini collocati su una corona di raggio analogo a quello urbano ($R_p \approx R_u$), la distanza massima si approssima a:

$$d_{max} \approx 2R_u$$

Questa formulazione consente di stimare rapidamente il diametro operativo potenziale del sistema e di confrontarlo con l'autonomia effettiva del drone cargo medio assunto come riferimento nel presente lavoro.

La verifica geometrica risulta particolarmente utile per valutare se il collegamento diretto magazzino–stazione sia compatibile con le prestazioni del velivolo o se, al contrario, sia necessario prevedere una rete di stazioni intermedie o una diversa distribuzione dei magazzini lungo il perimetro urbano.

Pur trattandosi di una semplificazione, lo schema città–cerchio costituisce uno strumento efficace per dimensionare in prima approssimazione il sistema e per verificare la coerenza tra scala urbana, autonomia del drone e architettura della rete infrastrutturale.

5.2.6 Robustezza del modello

Riconosco che:

- la domanda e-commerce è soggetta a stagionalità e picchi;
- il modello è una stima aggregata media;
- il valore 300 consegne/giorno rappresenta uno scenario intermedio.

Tuttavia, l'impostazione deterministica consente di effettuare facilmente analisi di sensitività variando q_{ecom} , f , $p_{eligible}$.

5.2.7 Conclusione

Ho definito:

- una microzona urbana coerente con principi di zonizzazione logistica;
- una domanda e-commerce stimata con modello quantitativo esplicito;
- una verifica di compatibilità fisica e geometrica con UAV cargo;
- un valore numerico replicabile:

$$300 \text{ consegne/giorno per microzona}$$

Questo dato costituisce la base per il modello di dimensionamento delle stazioni e della flotta UAV che svilupperò nel paragrafo successivo.

5.3 Applicazione del modello alla città di Roma: dimensionamento della rete di stazioni e della flotta UAV nello scenario “entro GRA”

5.3.1 Perché scelgo Roma e perché adotto il perimetro “entro GRA”

Per verificare la scalabilità del sistema UAV cargo definito nei paragrafi precedenti, applico il mio modello alla città di Roma. Scelgo Roma perché rappresenta un contesto urbano complesso e significativo dal punto di vista logistico: la domanda di consegne è elevata e frammentata, il tessuto edilizio è eterogeneo e il sistema stradale è soggetto a congestione e variabilità dei tempi. Questo rende Roma un caso adatto per testare una soluzione infrastrutturale basata su stazioni urbane e trasporto aereo leggero.

Per delimitare l'area urbana di riferimento scelgo di utilizzare il **Grande Raccordo Anulare (GRA)** come confine operativo. Il motivo è metodologico: il GRA costituisce un perimetro fisico continuo e riconoscibile che circonda la parte più consolidata della città. In questo modo ottengo un'area urbana coerente con l'idea di rete di microzone servite da stazioni su copertura, evitando che il modello venga “dilatato” includendo porzioni amministrative estese ma non pienamente urbanizzate.

Assumo quindi come area urbana di riferimento:

$$A_{GRA} = 389 \text{ km}^2$$

(valore adottato come ordine di grandezza per l'area racchiusa entro il GRA).

5.3.2 Input vincolanti derivanti dal §5.2

In questo capitolo non ridefinisco microzona e domanda: assumo come input vincolanti i risultati del §5.2 aggiornato, perché costituiscono la base comune e replicabile su cui costruisco il dimensionamento urbano.

5.3.2.1 Microzona tipo

Nel §5.2 ho definito la microzona come bacino pedonale “realmente locale” fissando:

$$r = 300 \text{ m} = 0,3 \text{ km}$$

Ho poi calcolato la superficie della microzona introducendo un coefficiente di forma urbano η , che rappresenta il fatto che la copertura reale non è perfettamente circolare e che vincoli urbani riducono l'area efficace:

$$A_{zone} = \eta \pi r^2 \quad \text{con } \eta = 0,75$$

Eseguo il calcolo:

$$A_{zone} = 0,75 \cdot 3,1416 \cdot (0,3)^2$$

$$(0,3)^2 = 0,09$$

$$3,1416 \cdot 0,09 = 0,2827$$

$$A_{zone} = 0,75 \cdot 0,2827 = 0,212 \text{ km}^2$$

Quindi assumo:

$$\boxed{A_{zone} \approx 0,21 \text{ km}^2}$$

Per la popolazione servita, nel §5.2 ho assunto una densità coerente con quartieri urbani compatti:

$$\rho = 13.500 \text{ ab/km}^2$$

e ho calcolato:

$$P_{zone} = \rho \cdot A_{zone} = 13.500 \cdot 0,21 = 2.835$$

Arrotondo:

$$P_{zone} \approx 2.800 \text{ abitanti}$$

5.3.2.2 Domanda e-commerce e domanda UAV-eligible per microzona

Nel §5.2 ho stimato la domanda e-commerce settimanale con:

$$D_{week,zone} = P_{zone} \cdot q_{ecom} \cdot f$$

assumendo:

$$q_{ecom} = 0,60; f = 1,5 \text{ ordini/settimana}$$

Eseguo il calcolo:

$$D_{week,zone} = 2.800 \cdot 0,60 \cdot 1,5$$

$$0,60 \cdot 1,5 = 0,90$$

$$D_{week,zone} = 2.800 \cdot 0,90 = 2.520$$

Quindi:

$$D_{week,zone} = 2.520 \text{ ordini/settimana}$$

Per la quota servibile mediante UAV, nel §5.2 ho mantenuto:

$$p_{weight/size} = 0,94; p_{goods} = 0,87$$

quindi:

$$p_{eligible} = p_{weight/size} \cdot p_{goods} = 0,94 \cdot 0,87 = 0,8178 \approx 0,82$$

Domanda UAV settimanale:

$$D_{UAV,week,zone} = 2.520 \cdot 0,82 = 2.066 \approx 2.070$$

Domanda UAV giornaliera:

$$D_{day,zone} = \frac{2.070}{7} = 295 \approx 300$$

Assumo quindi:

$$D_{day,zone} \approx 300 \text{ consegne/giorno per microzona}$$

5.3.2.3 Vincoli UAV e consegne per missione

Nel §5.2 ho definito il vincolo di payload:

$$W_{max} = 15 \text{ kg}; u = 0,80$$

$$W_{use} = u \cdot W_{max} = 0,80 \cdot 15 = 12 \text{ kg}$$

Ho assunto un peso medio collo rappresentativo:

$$\bar{W} = 2,8 \text{ kg}$$

e quindi:

$$n_{peso} = \frac{W_{use}}{\bar{W}} = \frac{12}{2,8} \approx 4,3 \Rightarrow 4$$

Ho verificato anche il vincolo volumetrico assumendo:

$$V_{max} = 80 \text{ l}; V_{use} = 0,80 \cdot 80 = 64 \text{ l}; \bar{V} = 15 \text{ l}$$
$$n_{volume} = \frac{64}{15} \approx 4,2 \Rightarrow 4$$

Poiché entrambi i vincoli convergono, nel §5.2 ho fissato:

$$n_{mission} = 4 \text{ consegne per missione}$$

5.3.3 Calcolo del numero di microzone entro GRA

A questo punto applico la zonizzazione all'area entro GRA. Il numero di microzone è:

$$N_{zone} = \frac{A_{GRA}}{A_{zone}}$$

Sostituisco i valori:

$$N_{zone} = \frac{389}{0,21} = 1.852,38$$

Poiché il numero di microzone deve essere intero e devo garantire copertura completa, arrotondo per eccesso:

$$N_{zone} = 1.853 \text{ microzone}$$

Questo valore rappresenta il numero di bacini elementari (raggio 300 m) necessari per coprire l'area urbana entro GRA secondo le ipotesi del §5.2.

5.3.4 Domanda urbana totale UAV nello scenario entro GRA

La domanda urbana totale UAV-eligible è data dal numero di microzone moltiplicato per la domanda giornaliera di ciascuna microzona:

$$D_{city} = N_{zone} \cdot D_{day,zone}$$

Sostituisco:

$$D_{city} = 1.853 \cdot 300$$

$$D_{city} = 555.900 \text{ consegne/giorno}$$

Quindi:

$$D_{city} = 555.900 \text{ consegne/giorno (entro GRA)}$$

5.3.5 Capacità della stazione: ore operative, tempo di servizio e numero di pad di atterraggio/decollo per ogni piattaforma

Per dimensionare la rete devo distinguere due vincoli:

- **vincolo di copertura:** quante stazioni servono per coprire tutte le microzone;
- **vincolo di capacità:** quante stazioni servono per gestire la domanda giornaliera.

Il numero finale di stazioni è:

$$N_s = \max (N_{cov}, N_{cap})$$

Nel mio modello, per coerenza con il §5.2, assumo che una stazione serva una microzona, quindi:

$$N_{cov} = N_{zone}$$

Per calcolare N_{cap} devo definire la capacità giornaliera di una stazione C_s . Io modello C_s attraverso:

- H : ore operative giornaliere;
- t_{serv} : tempo medio di servizio per evento (atterraggio + scarico + ripartenza);
- n_{pad} : numero di piazzole operative in parallelo;
- b_{drop} : consegne per evento (assumo 1 consegna/evento verso il locker).

Scelgo:

$$H = 12 \text{ ore/giorno}$$

come finestra operativa giornaliera realistica e prudentiale.

Assumo:

$$t_{serv} = 4 \text{ min}$$

Il valore deriva dalla scomposizione del turnaround in: avvicinamento e touchdown ($\approx 0,5-1$ min), messa in sicurezza e check di piattaforma ($\approx 0,3-0,7$ min), trasferimento del collo al sistema di handling ($\approx 1-2$ min), autorizzazione alla ripartenza ($\approx 0,5-1$ min) e decollo con clearing della piattaforma ($\approx 0,5-1$ min). L'ordine di grandezza è coerente con soluzioni industriali di docking automatizzato che dichiarano tempi inferiori al minuto per singole operazioni (es. battery swap e inserimento pacco), ma risulta più prudentiale perché include buffer operativi e procedure di sicurezza tipiche del contesto urbano su copertura.

Assumo:

$$b_{drop} = 1$$

perché ogni evento corrisponde al completamento di una consegna verso la stazione.

5.3.5.1 Capacità di una singola piazzola

Numero di eventi per piazzola:

$$n_{event} = \frac{H \cdot 60}{t_{serv}} = \frac{12 \cdot 60}{4} = \frac{720}{4} = 180$$

Capacità per piazzola:

$$C_{s,1} = n_{event} \cdot b_{drop} = 180 \cdot 1 = 180 \text{ consegne/giorno}$$

Quindi:

$$\boxed{C_{s,1} = 180 \text{ consegne/giorno per pad}}$$

5.3.5.2 Numero minimo di pad per servire una microzona

Perché una singola stazione possa servire una microzona (senza dover duplicare stazioni per capacità), imposto:

$$C_s \geq D_{day,zone}$$

Poiché:

$$C_s = n_{pad} \cdot C_{s,1} = n_{pad} \cdot 180$$

otteniamo:

$$n_{pad} \cdot 180 \geq 300$$

$$n_{pad} \geq \frac{300}{180} = 1,67$$

Arrotondo a intero:

$$\boxed{n_{pad} = 2}$$

Con due pad:

$$C_s = 2 \cdot 180 = 360 \text{ consegne/giorno}$$

$$\boxed{C_s = 360 \text{ consegne/giorno per stazione}}$$

Questo passaggio è progettualmente rilevante: indica che, con la domanda del §5.2, una stazione “mono-pad” non è sufficiente, mentre una stazione “bi-pad” è coerente con la domanda media di una microzona.

5.3.6 Numero di stazioni urbane entro GRA

A questo punto calcolo il vincolo capacitivo:

$$N_{cap} = \left\lceil \frac{D_{city}}{C_s} \right\rceil$$

Sostituisco:

$$N_{cap} = \left\lceil \frac{555.900}{360} \right\rceil$$

$$\frac{555.900}{360} = 1.544,17 \Rightarrow N_{cap} = 1.545$$

Il vincolo di copertura è:

$$N_{cov} = N_{zone} = 1.853$$

Quindi:

$$N_s = \max(1.853, 1.545) = 1.853$$

$$\boxed{N_s = 1.853 \text{ stazioni urbane entro GRA}}$$

Interpretazione: nel mio scenario, fissando $n_{pad} = 2$, la rete è guidata dalla **copertura geografica** (numero di microzone) e non dalla capacità. Questo è coerente con il fatto che il bacino pedonale (300 m) è la scelta che determina il livello di servizio spaziale.

5.3.7 Dimensionamento della flotta UAV entro GRA

Per stimare la flotta trasformo la domanda giornaliera totale in numero di droni necessari. Nel §5.2 ho fissato:

$$n_{mission} = 4 \text{ consegne per missione}$$

Per calcolare quante consegne può effettuare un drone in un giorno, devo stimare quante missioni può compiere. Assumo:

- finestra operativa giornaliera coerente con le stazioni:

$$H_d = 12 \text{ ore/giorno} \Rightarrow 720 \text{ min/giorno}$$

- tempo ciclo medio di missione:

$$t_{cycle} = 50 \text{ minuti}$$

Il valore $t_{cycle} = 50$ minuti deriva da una scomposizione analitica del ciclo missione hub $\rightarrow$ 4 stazioni $\rightarrow$ hub. Considerando l'area entro GRA ($R_u \approx 11$ km), la distanza media hub–microzona è circa 6–7 km; la distanza totale percorsa in missione risulta ≈ 16 km. Con una velocità prudenziale di 54 km/h (15 m/s), il tempo di volo è ≈ 18 minuti. A questo sommo 16 minuti di operazioni a terra (4 stazioni $\times$ 4 min) e circa 6 minuti per decollo/atterraggio in hub. Applicando infine un margine operativo del 20–25% per variabilità reale, ottengo un tempo ciclo medio prudenziale pari a 50 minuti.

Missioni per drone:

$$m_d = \frac{720}{50} = 14,4 \text{ missioni/giorno}$$

Consegne per drone (lordo):

$$C_{d,raw} = m_d \cdot 4 = 14,4 \cdot 4 = 57,6 \text{ consegne/giorno}$$

Introduco un fattore di utilizzo reale per tenere conto di indisponibilità operative (meteo, manutenzione, buffering):

$$u_d = 0,70$$

Consegne effettive per drone:

$$C_d = u_d \cdot C_{d,raw} = 0,70 \cdot 57,6 = 40,32 \approx 40$$

Quindi assumo:

$$C_d \approx 40 \text{ consegne/giorno per drone}$$

Numero di droni necessari:

$$N_d = \left\lceil \frac{D_{city}}{C_d} \right\rceil = \left\lceil \frac{555.900}{40} \right\rceil$$

$$\frac{555.900}{40} = 13.897,5 \Rightarrow N_d = 13.898$$

$$N_d = 13.898 \text{ droni (entro GRA)}$$

5.3.8 Risultati finali nello scenario “entro GRA”

Riassumo i risultati principali ottenuti applicando il modello alla città di Roma entro GRA:

- numero di microzone:

$$N_{zone} = 1.853$$

- domanda totale UAV-eligible:

$$D_{city} = 555.900 \text{ consegne/giorno}$$

- numero minimo di pad per stazione (per servire una microzona):

$$n_{pad} = 2$$

- capacità stazione (con 2 pad):

$$C_s = 360 \text{ consegne/giorno}$$

- numero stazioni urbane:

$$N_s = 1.853$$

- produttività drone assunta:

$$C_d \approx 40 \text{ consegne/giorno per drone}$$

- numero droni:

$$N_d = 13.898$$

5.3.9 Lettura critica dei risultati e implicazioni progettuali

L'esito più importante del dimensionamento è che, con la microzona definita nel §5.2 (raggio 300 m), il sistema risulta **guidato dalla copertura**: il numero di stazioni coincide con il numero di microzone, perché fissando una stazione “bi-pad” la capacità giornaliera della singola stazione (360 consegne/giorno) supera la domanda media della microzona (300 consegne/giorno). In altri termini, la scelta del bacino pedonale da 300 m stabilisce il livello di servizio spaziale e determina direttamente il numero di stazioni.

Allo stesso tempo, il calcolo del numero minimo di pad mostra che una stazione “mono-pad” non sarebbe coerente con la domanda media della microzona, perché:

$$C_{s,1} = 180 < 300$$

mentre con due piazzole operative la stazione diventa compatibile:

$$C_s = 360 \geq 300$$

Questa conclusione ha un impatto progettuale diretto: nel mio scenario, la stazione urbana non può essere pensata come semplice piattaforma di appoggio, ma deve essere progettata come nodo operativo in grado di parallelizzare le operazioni.

Infine, la stima della flotta evidenzia che il numero di droni dipende in modo sensibile dal tempo ciclo di missione e dal fattore di utilizzo reale. Miglioramenti nel tempo ciclo o nella continuità operativa si traducono immediatamente in una riduzione del numero di droni necessari a parità di domanda.

5.4 Progettazione tecnica e standardizzazione della stazione di atterraggio

La stazione di atterraggio rappresenta il punto di interfaccia fisico tra il sistema UAV cargo definito nei §§5.1–5.3 e l’ambiente urbano. Se nei paragrafi precedenti ne sono stati chiariti il ruolo sistemico, il bacino di servizio e il dimensionamento numerico nello scenario “entro GRA”, in questa sezione viene affrontata la definizione tecnico-costruttiva dell’infrastruttura, mantenendo come vincoli progettuali i parametri operativi già assunti.

La stazione non può essere interpretata come una semplice superficie di appoggio, ma come un’infrastruttura tecnica permanente, progettata per operare in modo continuativo, con elevata frequenza di cicli giornalieri e con logica di replicabilità su scala urbana. Considerata la previsione di circa 1800 installazioni nello scenario entro GRA, la progettazione deve fondarsi su un modulo standard compatibile con una pluralità di edifici esistenti.

5.4.1 Coerenza tra classe UAV adottata e requisiti strutturali

Il dimensionamento della stazione è direttamente vincolato alla classe UAV cargo assunta nel modello, caratterizzata da payload nominale fino a 15 kg, velocità di crociera di progetto compresa tra 12 e 15 m/s e tempo ciclo medio prudenziale pari a 50 min per missione hub → 4 microzone → hub.

Questi parametri costituiscono il quadro tecnico di riferimento per la verifica strutturale della piattaforma. La massa complessiva in atterraggio, data dalla somma di massa del velivolo e carico utile, rappresenta il parametro fondamentale per la valutazione dei carichi verticali trasmessi alla copertura.

Tuttavia, la verifica non può limitarsi all'equivalenza statica del peso. L'atterraggio genera azioni dinamiche localizzate associate alla fase di touchdown e stabilizzazione. Tali azioni, ripetute per un numero elevato di missioni giornaliere, introducono effetti ciclici che impongono una progettazione orientata non solo alla resistenza ultima, ma anche alla durabilità e al controllo della fatica nel tempo.

La stazione deve quindi essere dimensionata in modo coerente con:

- la massa operativa del velivolo;
- la frequenza degli atterraggi determinata dalla domanda per microzona;
- la configurazione bi-pad risultata necessaria nel §5.3.

5.4.2 Implicazioni del profilo operativo multi-stop

Nel modello sviluppato nel §5.3, ogni drone effettua una missione composta da quattro atterraggi su stazioni urbane distinte prima del rientro all'hub. Questo schema multi-stop implica che ciascuna stazione sia soggetta a un regime di esercizio ciclico distribuito lungo l'intera finestra operativa giornaliera.

La piattaforma deve quindi essere verificata rispetto a:

- azioni dinamiche in fase di touchdown;
- vibrazioni indotte dal contatto e dalla rotazione dei rotori;
- effetti di fatica legati alla ripetitività delle sollecitazioni;
- azioni ambientali tipiche di una copertura (vento, neve, escursioni termiche).

La coerenza tra numero di missioni giornaliere, configurazione bi-pad e capacità strutturale costituisce un passaggio essenziale per dimostrare la sostenibilità tecnica del sistema nel lungo periodo.

5.4.3 Layout funzionale della stazione: LP + PH + SL + ES

Non ho concepito la stazione di atterraggio come semplice superficie di appoggio, ma come nodo logistico automatizzato integrato, composto da moduli funzionali interconnessi. Il layout di riferimento adottato nel presente lavoro è costituito da:

- piattaforma di atterraggio (Landing Platform, **LP**);
- modulo di Parcel Handling (**PH**);
- sistema di Storage/Locker (**SL**);
- modulo Energy & Service (**ES**).

La configurazione prevede **due LP affiancate (bi-pad)**, al fine di separare le fasi di arrivo, servizio e ripartenza, riducendo la congestione operativa e aumentando l'affidabilità del nodo, in coerenza con il modello multi-stop definito nel §5.3.

Piattaforma di atterraggio (Landing Platform, LP)

La LP costituisce la prima interfaccia fisica tra drone e stazione ed è destinata alle manovre automatiche di atterraggio e decollo.

Essa viene trattata come modulo standardizzato comprendente:

- un'area centrale di touchdown;
- una fascia tecnica perimetrale destinata a dispositivi di sicurezza, sensoristica, sistemi di guida e percorsi di manutenzione;
- un lato operativo predisposto all'interfaccia con PH ed ES.

Tale impostazione è coerente con quanto discusso nei §§5.2–5.4, dove la piattaforma è definita come infrastruttura tecnica complessa, dotata di sistemi di sicurezza passiva e attiva e procedure fail-safe.

Energy & Service (ES)

Il modulo **ES** integra le funzioni energetiche e di servizio, consentendo:

- ricarica controllata delle batterie;
- sostituzione rapida (battery swap);
- gestione energetica centralizzata del nodo.

Il sistema comprende:

- area di stoccaggio batterie;
- sistema di ricarica controllata;
- sottosistema robotizzato per la sostituzione automatizzata delle batterie sul drone.

In continuità con quanto discusso nel Capitolo 4.2, l'ES riduce i tempi di inattività e rende la stazione un nodo non solo logistico ma anche energetico, contribuendo alla scalabilità del sistema.

Parcel Handling (PH)

Il modulo **PH** costituisce l'interfaccia tra il sistema di volo autonomo e i sistemi automatizzati a terra. Esso svolge tre funzioni principali:

1. presa del pacco dal drone in condizioni controllate;
2. segregazione fisica tra area di volo e aree tecniche/accessibili;
3. trasferimento verso lo Storage/Locker (SL).

La presa avviene mediante sistema robotico autonomo (braccio a cinematica semplificata o dispositivo guidato su rotaia), dotato di sensori di riconoscimento e logiche di sicurezza.

Il trasferimento PH–SL può avvenire tramite:

- scivolo gravitazionale a pendenza controllata;
- sistemi a rulli o mini-conveyor, in continuità con le soluzioni di automazione intralogistica richiamate nel §5.1.

Il collegamento deve garantire protezione dagli agenti atmosferici, segregazione e continuità del flusso anche in caso di indisponibilità temporanea di una LP.

Storage/Locker (SL)

Il modulo **SL** rappresenta l'interfaccia con l'utente finale e realizza il principio della “consegna sempre riuscita”, disaccoppiando temporalmente consegna e ritiro.

È organizzato in scomparti individuali (locker) con accesso controllato tramite autenticazione digitale (QR/app/NFC).

Il dimensionamento dello SL deve derivare dall'analisi logistica della microzona (volume consegne, distribuzione temporale, tempi medi di giacenza), in coerenza con la logica di scalabilità discussa nei §§5.1–5.2.

Un requisito distintivo è la presenza di scomparti a controllo termico, che implicano compartimentazione, monitoraggio termo-igrometrico e predisposizioni impiantistiche coerenti con l'integrazione edilizia.

5.4.4 Dimensionamento planimetrico della configurazione standard

Definito il layout funzionale, è possibile formalizzarne l'ingombro planimetrico.

Introduco le seguenti grandezze:

$$L_{LP} = 9,0 \text{ m}$$

lunghezza complessiva delle due Landing Platform affiancate.

$$B_{LP} = 4,5 \text{ m}$$

larghezza complessiva del modulo LP.

$$d_{serv} = 3,0 \text{ m}$$

profondità della fascia di servizio comprendente PH, SL ed ES.

Ingombro minimo funzionale:

La dimensione longitudinale della stazione coincide con quella delle LP:

$$\begin{aligned} L_{min} &= L_{LP} \\ L_{min} &= 9,0 \text{ m} \end{aligned}$$

La dimensione trasversale è data da:

$$B_{min} = B_{LP} + d_{serv}$$
$$B_{min} = 4,5 + 3,0 = 7,5 \text{ m}$$

La superficie minima funzionale risulta:

$$A_{min} = L_{min} \cdot B_{min}$$
$$A_{min} = 9,0 \times 7,5$$
$$A_{min} = 67,5 \text{ m}^2$$

Ingombro con fascia perimetrale di sicurezza:

Introduco ora una fascia tecnica esterna di ampiezza f .

Caso $f = 0,50 \text{ m}$

$$L_{0,5} = L_{min} + 2f = 9,0 + 1,0 = 10,0 \text{ m}$$
$$B_{0,5} = B_{min} + 2f = 7,5 + 1,0 = 8,5 \text{ m}$$
$$A_{0,5} = 10,0 \times 8,5 = 85 \text{ m}^2$$

Caso $f = 1,00 \text{ m}$

$$L_{1,0} = 9,0 + 2,0 = 11,0 \text{ m}$$
$$B_{1,0} = 7,5 + 2,0 = 9,5 \text{ m}$$
$$A_{1,0} = 11,0 \times 9,5 = 104,5 \text{ m}^2$$

Intervallo planimetrico realistico: $85 \text{ m}^2 \leq A_{stazione} \leq 104,5 \text{ m}^2$

Questo intervallo costituisce il primo criterio tecnico per la selezione delle coperture idonee nello scenario entro GRA, prima delle verifiche strutturali dettagliate.

5.4.5 Sicurezza operativa e integrazione edilizia

Considerata l'elevata frequenza di utilizzo, la sicurezza deve essere impostata secondo un approccio multilivello che integri misure passive, attive e procedurali.

Dal punto di vista passivo, la piattaforma deve prevedere dispositivi perimetrali di protezione e superfici con adeguate caratteristiche di aderenza e resistenza agli agenti atmosferici.

Dal punto di vista attivo, la stazione deve integrare sistemi di monitoraggio delle condizioni operative (sensori vento, verifica ostacoli, marker visivi e beacon di supporto all'atterraggio automatico).

Le procedure fail-safe devono essere coerenti con il modello multi-stop: in caso di condizioni non conformi, il sistema deve consentire l'interruzione dell'atterraggio o il mantenimento in quota, evitando che una criticità locale comprometta l'intera missione.

L'ancoraggio alla struttura dell'edificio deve avvenire esclusivamente su elementi strutturali primari, con sistemi di ripartizione dei carichi e collegamenti meccanici reversibili, garantendo compatibilità con edifici residenziali esistenti e maggiore integrazione nei nodi logistici di partenza e rientro.

5.4.6 Replicabilità strutturale e scelta tipologica

Alla scala urbana considerata, la replicabilità diventa criterio progettuale primario. L'installazione diffusa di stazioni richiede una soluzione di sostegno che sia:

- leggera;
- prefabbricabile;
- adattabile a schemi strutturali differenti;
- reversibile;
- controllabile nei percorsi di carico.

Il confronto tra le tipologie strutturali analizzate conduce a privilegiare la struttura reticolare metallica quale soluzione più coerente con l'impostazione del progetto.

Essa consente contenimento dei carichi permanenti, montaggio a secco, adattabilità alle diverse maglie strutturali e possibilità di standardizzazione industriale del modulo.

Le alternative — telaio pieno, calcestruzzo prefabbricato, legno ingegnerizzato — presentano criticità legate rispettivamente a peso proprio, minore flessibilità o maggiore manutenzione nel lungo periodo.

In coerenza con l'obiettivo di implementazione sistemica nello scenario entro GRA, la struttura reticolare emerge quindi come soluzione strutturalmente e strategicamente più compatibile.

5.5 Procedura tecnica per la verifica di fattibilità dell'installazione (caso studio – configurazione prudentiale)

Ho articolato la verifica di fattibilità dell'installazione della stazione su copertura in **cinque fasi sequenziali**:

1. **Definizione geometrica standard (superfici/ingombri)**
2. **Quadro normativo di riferimento**
3. **Modellazione strutturale del sistema**
4. **Verifiche tecniche**
5. **Output tecnico conclusivo**

Tale articolazione consente di trasformare un'ipotesi di installazione in una decisione tecnica **motivata e replicabile** su larga scala urbana.

5.5.1 Definizione geometrica standard (superfici/ingombri)

Prima di ogni calcolo strutturale, ho definito l'ingombro fisico minimo del sistema e si verifica la compatibilità spaziale con la copertura.

Configurazione standard adottata:

- **2 LP affiancate:** $9,0 \times 4,5$ m
- **Striscia tecnica PH + SL:** profondità 3,0 m
- **Ingombro minimo rettangolare:** $9,0 \times 7,5$ m

Superficie minima pura layout:

$$A_{min} = 9,0 \cdot 7,5 = 67,5 \text{ m}^2$$

Per rendere l'installazione effettivamente praticabile su copertura (manutenzione, sicurezza, accessi) ho previsto una fascia esterna tecnica.

Nel caso studio ho adottato la configurazione **più prudentiale** con fascia 1,0m per lato:

$$(9,0 + 2,0) \cdot (7,5 + 2,0) = 11,0 \cdot 9,5 = 104,5 \text{ m}^2$$

Da qui in avanti tutte le verifiche sono svolte assumendo:

$$A = 104,5 \text{ m}^2 \text{ (impronta unica del sistema)}$$

Drone di riferimento e carico in atterraggio

Assunzione: DJI FlyCart 30 con massa 65 kg (con due batterie) e payload 15 kg:

$$m_{UAV} = 80 \text{ kg}$$

Assunzione dinamica touchdown:

$$\varphi = 2,0$$

Motivazione: rappresenta amplificazione dinamica prudenziale per atterraggio controllato; il carico non governa il globale ma è rilevante come azione **concentrata locale** sui traversi/pannelli della LP e nei dettagli.

5.5.2 Quadro normativo di riferimento

La verifica strutturale e installativa è impostata in coerenza con:

- **NTC 2018** (D.M. 17/01/2018) e **Circolare 7/2019** (azioni, combinazioni, SLU/SLE)
- **EN 1990** (principi e combinazioni)
- **EN 1991-1-1** (azioni permanenti e carichi d'uso)
- **EN 1991-1-3** (neve)
- **EN 1991-1-4** (vento: pressioni e risucchi)
- **EN 1993-1-1** (acciaio)
- **EN 1992-4** (ancoraggi su calcestruzzo)
- **D.Lgs. 81/08, UNI EN 795** (sicurezza in copertura e anticaduta)
- **CEI EN 62305** (protezione contro i fulmini e valutazione LPS)

L'inclusione del **carico neve** è necessaria in quanto la stazione costituisce elemento in copertura e può essere soggetta a combinazioni gravose **neve + permanenti**.

Il dimensionamento del caso studio è condotto secondo il metodo agli Stati Limite previsto da EN 1990 e NTC 2018, con verifiche agli SLU di tipo STR e EQU/UPL e verifiche agli SLE di deformazione, integrate da controlli specialistici secondo EN 1993-1-1 (carpenteria metallica) ed EN 1992-4 (ancoraggi su calcestruzzo), garantendo coerenza normativa e tracciabilità dell'intero processo di calcolo.

5.5.3 Modellazione strutturale del sistema

5.5.3.1 Sistema strutturale e materiali (scelta di riferimento)

Ho modellato la stazione come **struttura secondaria metallica** (telaio/graticcio) vincolata alla copertura tramite **ancoraggi post-installati** su elementi portanti in c.a. (travi/cordoli/soletta strutturale verificata).

Componenti e materiali (definiti in modo univoco):

- Telaio portante: acciaio **S275** zincato a caldo
- Piani di camminamento/LP: grigliato/pannelli metallici antisdrucchio (acciaio zincato)
- Piastre di base: acciaio S275 + interposizione elastomerica (HDPE/neoprene)
- Ancoraggi: **M12** certificati (ETA), idonei per calcestruzzo fessurato (verifica EN 1992-4)
- Moduli PH/SL: carpenterie leggere + rulliere in acciaio zincato
- ES e batterie: accumulo in armadio tecnico metallico con adeguato grado IP e ventilazione

5.5.3.2 Modalità di trasferimento dei carichi

Ho adottato un modello che privilegia:

- **carichi distribuiti** sull'impronta del sistema $A = 104,5\text{m}^2$
- **scarico su appoggi localizzati** (piastre) posizionati su elementi portanti primari
- **ancoraggi reversibili** (bullonati/post-installati) per rendere l'intervento ispezionabile e removibile

Nel caso studio ho assunto una maglia di vincoli coerente con la dimensione dell'impianto:

$$n = 16 \text{ appoggi/ancoraggi}$$

Nomenclatura (simboli e grandezze)

Geometria e aree

- A = area/impronta complessiva del sistema in copertura [m^2]
- A_{min} = area minima layout senza fasce tecniche [m^2]
- $A_{esposta}$ = area equivalente esposta al vento orizzontale [m^2]
- L = luce di calcolo del traverso (trave semplicemente appoggiata) [m]

- s = passo dei traversi secondari [m]
- b = braccio tra file principali di ancoraggi (per ribaltamento) [m]
- z = quota del baricentro delle pressioni del vento rispetto al piano ancoraggi [m]
- A_p = area piastra di base/appoggio [m²]

Azioni permanenti (caratteristiche)

- G_k = azione permanente caratteristica [kN]
- $G_{k,tot}$ = somma delle permanenti caratteristiche del sistema [kN]
- $g_{k,tot}$ = carico permanente equivalente per unità di superficie [kN/m²]
- G_1 = permanenti strutturali principali (es. carpenteria + deck + moduli) [kN]
- G_2 = permanenti portati/accessori (es. impianti, accessori) [kN]

Azioni variabili (caratteristiche)

- Q_k = azione variabile caratteristica [kN]
- q_k = carico variabile caratteristico per unità di superficie [kN/m²]
- $q_{k,man}$ = sovraccarico manutenzione caratteristico [kN/m²]
- $Q_{k,man}$ = sovraccarico manutenzione totale [kN]

Neve

- q_{sk} = carico neve al suolo caratteristico (sito-dipendente) [kN/m²]
- q_s = carico neve su copertura [kN/m²]
- μ_i = coefficiente di forma neve (copertura) [-]
- C_E = coefficiente di esposizione [-]
- C_t = coefficiente termico [-]
- $Q_{k,neve}$ = carico neve totale caratteristico [kN]

Vento

- $q_{w,k}$ = pressione equivalente caratteristica del vento (uplift/orizzontale) [kN/m²]
- $Q_{k,vento}$ = risultante di uplift caratteristica su area A [kN]
- $V_{k,vento}$ = risultante orizzontale caratteristica del vento [kN]

Drone

- m_{UAV} = massa del drone in atterraggio (drone + payload) [kg]
- g = accelerazione di gravità (9,81) [m/s^2]
- $Q_{k,UAV}$ = carico verticale statico caratteristico del drone [kN]
- φ = fattore dinamico touchdown [-]
- $Q_{k,TD}$ = carico caratteristico touchdown (dinamico) [kN]
- $Q_{d,TD}$ = carico di progetto touchdown (SLU) [kN]

Coefficienti parziali e combinazioni

- γ_G = coefficiente parziale permanenti (NTC) [-]
- γ_Q = coefficiente parziale variabili (NTC) [-]
- q_d = carico superficiale di progetto (SLU STR) [kN/m^2]
- $Q_{d,tot}$ = carico verticale totale di progetto [kN]
- q_{SLE} = carico superficiale per verifica SLE [kN/m^2]

Sollevamento e ancoraggi

- $F_{up,d}$ = azione sollevante di progetto (vento) [kN]
- $F_{down,d}$ = azione stabilizzante di progetto (permanenti ridotte) [kN]
- $T_{Ed,tot}$ = trazione totale di progetto sugli ancoraggi [kN]
- n = numero di ancoraggi/appoggi [-]
- N_{Ed} = trazione di progetto media per ancorante [kN]
- $N_{Ed,loc}$ = trazione di progetto locale (con amplificazione prudenziale) [kN]
- V_{Ed} = taglio di progetto medio per ancorante [kN]
- $V_{Ed,loc}$ = taglio locale prudenziale per ancorante [kN]

Ribaltamento

- M_{Ed} = momento ribaltante di progetto [kNm]
- ΔT = incremento di trazione equivalente dovuto al ribaltamento [kN]
- ΔN = incremento di trazione per ancorante dovuto al ribaltamento [kN]
- $N_{Ed,crit,loc}$ = trazione locale critica (uplift + ribaltamento + prudenza) [kN]

Resistenze ancoraggi (EN 1992-4)

- f_{ck} = resistenza caratteristica cilindrica calcestruzzo $[\text{N/mm}^2]$
- h_{ef} = profondità efficace ancorante [mm]
- $k_{cr,N}$ = coefficiente per calcestruzzo fessurato (trazione) [-]
- $N_{Rk,c}^0$ = resistenza caratteristica a cono (singolo ancorante) [kN]
- $\gamma_{M,c}$ = coefficiente parziale per calcestruzzo (ancoraggi) [-]
- $N_{Rd,c}$ = resistenza di progetto a cono [kN]
- V_{Rd} = resistenza di progetto a taglio [kN]

Verifica acciaio (traversi)

- w_d = carico lineare di progetto sul traverso [kN/m]
- M_{Ed} = momento flettente di progetto [kNm]
- V_{Ed} = taglio di progetto [kN]
- M_{Rd} = momento resistente di progetto [kNm]
- V_{Rd} = taglio resistente di progetto [kN]
- f_{max} = freccia massima [mm]

5.5.4 Verifiche tecniche (con calcoli espliciti)

5.5.4.1 Azioni permanenti G_k (sistema unico 2LP + PH+SL + ES + batterie)

(A) Carpenteria metallica (telaio/graticcio)

Per la configurazione prudenziale (maglia più fitta, irrigidimenti locali in zona PH), ho assunto un peso equivalente cautelativo:

$$G_{acciaio} = 43,0 \text{ kN}$$

(B) Piano di calpestio (LP + fasce tecniche)

Massa superficiale cautelativa:

$$g_{deck} = 0,30 \text{ kN/m}^2$$

$$G_{deck} = g_{deck} A = 0,30 \cdot 104,5 = 31,35 \text{ kN}$$

(C) Moduli PH + SL (rulliere, telai, involucro)

$$G_{PH+SL} = 14,75 \text{ kN}$$

(D) ES + batterie di servizio (continuità operativa)

$$G_{ES+batt} = 5,0 \text{ kN}$$

(E) Accessori (parapetti, sensoristica, quadri, cablaggi, protezioni)

$$G_{acc} = 5,54 \text{ kN}$$

Totale permanenti caratteristici:

$$G_{k,tot} = 43,0 + 31,35 + 14,75 + 5,0 + 5,54 = 99,64 \text{ kN}$$

Carico permanente equivalente medio:

$$g_{k,tot} = \frac{G_{k,tot}}{A} = \frac{99,64}{104,5} = 0,95 \text{ kN/m}^2$$

5.5.4.2 Azioni variabili Q_k

(B1) Sovraccarico di manutenzione/presidio 100 kg/m^2 :

$$q_{k,man} = 100 \cdot 9,81 \approx 981 \text{ N/m}^2 \approx 1 \text{ kN/}$$

$$Q_{k,man} = q_{k,man} A = 1,0 \cdot 104,5 = 104,5 \text{ kN}$$

(B2) Carico neve (copertura piana)

$$q_s = \mu_i q_{sk} C_E C_t$$

Ho assunto per il caso studio:

$$\mu_i = 0,8, C_E = 1,0, C_t = 1,0 \Rightarrow q_s = 0,8 q_{sk}$$

$$Q_{k,neve} = q_s A = 0,8 q_{sk} \cdot 104,5 = 83,6 q_{sk} \text{ kN}$$

Esempio numerico:

$$q_{sk} = 0,60 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow q_s = 0,48 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{k,neve} = 0,48 \cdot 104,5 = 50,16 \text{ kN}$$

(B3) Carico UAV (DJI FlyCart 30 + payload 15 kg)

Dalla scheda tecnica: FlyCart 30 pesa **65 kg con due batterie**.

Ho considerato **+15 kg** a pieno carico:

$$m_{UAV} = 65 + 15 = 80 \text{ kg}$$

Carico statico caratteristico:

$$Q_{k,UAV} = m_{UAV}g = 80 \cdot 9,81 = 785 \text{ N} = 0,785 \text{ kN}$$

Per rappresentare il touchdown (atterraggio controllato) ho assunto un **fattore dinamico** prudenziale:

$$\varphi = 2,0 \Rightarrow Q_{k,TD} = \varphi Q_{k,UAV} = 2 \cdot 0,785 = 1,57 \text{ kN}$$

Valore di progetto (SLU) del touchdown:

$$Q_{d,TD} = 1,5 \cdot Q_{k,TD} = 1,5 \cdot 1,57 = 2,36 \text{ kN}$$

Nota: il carico UAV è applicato come **carico concentrato locale** su una LP (condizione peggiore per i traversi), non come carico distribuito sull'intera impronta.

5.5.4.3 Azioni ambientali – vento (uplift e orizzontale)

(C1) Vento – uplift (risucchio) sull'impronta

In coerenza con il caso studio precedente ho assunto una pressione equivalente cautelativa:

$$q_{w,k} = 0,88 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{k,vento} = q_{w,k} A = 0,88 \cdot 104,5 = 91,96 \text{ kN}$$

(C2) Vento orizzontale

Area esposta equivalente (corpo tecnico + schermature/volumi) assunta:

$$A_{esposta} = L \cdot h_{eq} = 11,0 \cdot 1,5 = 16,5 \text{ m}^2$$

$$V_{k,vento} = q_{w,k} A_{esposta} = 0,88 \cdot 16,5 = 14,52 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,vento} = 1,5 V_{k,vento} = 1,5 \cdot 14,52 = 21,78 \text{ kN}$$

5.5.4.4 Combinazioni di carico (SLU e SLE)

(1) SLU STR – verifica verticale (manutenzione dominante)

$$q_d = 1,3 g_{k,tot} + 1,5 q_{k,man} = 1,3 \cdot 0,95 + 1,5 \cdot 1,0$$

$$q_d = 1,235 + 1,5 = 2,735 \text{ kN/m}^2$$

Carico verticale totale di progetto:

$$Q_{d,tot} = q_d A = 2,735 \cdot 104,5 = 285,8 \text{ kN}$$

Combinazione alternativa (neve dominante, esempio):

$$q_s = 0,48 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow q_{d,snow} = 1,3 \cdot 0,95 + 1,5 \cdot 0,48 = 1,235 + 0,72 = 1,955 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{d,snow} = 1,955 \cdot 104,5 = 204,4 \text{ kN}$$

Nel caso studio la combinazione con manutenzione risulta più gravosa per il verticale.

(2) SLE – verifica deformazioni

SLE cautelativo (quasi caratteristica):

$$q_{SLE} = g_{k,tot} + q_{k,man} = 0,95 + 1,0 = 1,95 \text{ kN/m}^2$$

(3) SLU EQU – sollevamento (vento senza neve)

Sollevamento di progetto:

$$F_{up,d} = 1,5 Q_{k,vento} = 1,5 \cdot 91,96 = 137,94 \text{ kN}$$

Separo i permanenti in:

$$G_2 = G_{ES+batt} + G_{acc} = 5,0 + 5,54 = 10,54 \text{ kN}$$

$$G_1 = G_{k,tot} - G_2 = 99,64 - 10,54 = 89,10 \text{ kN}$$

Azioni stabilizzanti (favorevoli ridotte):

$$F_{down,d} = 0,9G_1 + 0,8G_2 = 0,9 \cdot 89,10 + 0,8 \cdot 10,54$$

$$F_{down,d} = 80,19 + 8,43 = 88,62 \text{ kN}$$

Trazione totale sugli ancoraggi:

$$T_{Ed,tot} = F_{up,d} - F_{down,d} = 137,94 - 88,62 = 49,32 \text{ kN}$$

5.5.4.5 Verifica ancoraggi: trazione e taglio per ancorante (sistema unico)

Ho assunto $n = 16$ ancoraggi:

$$N_{Ed} = \frac{T_{Ed,tot}}{n} = \frac{49,32}{16} = 3,08 \text{ kN}$$

Amplificazione prudenziale per non uniformità/eccentricità:

$$N_{Ed,loc} \approx 2 \cdot 3,08 = 6,16 \text{ kN/ancorante}$$

Taglio medio da vento orizzontale:

$$V_{Ed} = \frac{V_{Ed,vento}}{16} = \frac{21,78}{16} = 1,36 \text{ kN}$$

Con prudenza ($\times 2$):

$$V_{Ed,loc} \approx 2 \cdot 1,36 = 2,72 \text{ kN/ancorante}$$

5.5.4.6 Verifica ribaltamento (momento da vento)

Quota baricentro pressioni:

$$z = 1,0 \text{ m}$$

Momento ribaltante:

$$M_{Ed} = V_{Ed,vento} z = 21,78 \cdot 1,0 = 21,78 \text{ kNm}$$

Braccio tra le file di ancoraggi (dimensione trasversale):

$$b = 9,5 \text{ m}$$

Coppia richiesta:

$$\Delta T = \frac{M_{Ed}}{b} = \frac{21,78}{9,5} = 2,29 \text{ kN}$$

Incremento per ancorante sulla fila più sollecitata (8 ancoranti):

$$\Delta N = \frac{2,29}{8} = 0,286 \text{ kN}$$

Trazione “media + ribaltamento”:

$$N_{Ed,crit} = 3,08 + 0,286 = 3,37 \text{ kN}$$

Con prudenza ($\times 2$):

$$N_{Ed,crit,loc} \approx 6,74 \text{ kN/ancorante}$$

5.5.4.7 Verifica EN 1992-4 – controllo numerico “cone failure” (trazione)

Ipotesi caso studio (da confermare su tavole/prove in sito):

- calcestruzzo **C25/30** $\Rightarrow f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$
- ancorante **M12**
- profondità efficace: $h_{ef} = 100 \text{ mm}$
- calcestruzzo fessurato: $k_{cr,N} = 7,7$
- $\gamma_{M,c} = 1,5$

Resistenza caratteristica a cono:

$$N_{Rk,c}^0 = k_{cr,N} \sqrt{f_{ck}} h_{ef}^{1,5}$$

$$\sqrt{f_{ck}} = \sqrt{25} = 5 h_{ef}^{1,5} = 100^{1,5} = 1000$$

$$N_{Rk,c}^0 = 7,7 \cdot 5 \cdot 1000 = 38,5 \text{ kN}$$

Resistenza di progetto:

$$N_{Rd,c} = \frac{N_{Rk,c}}{\gamma_{M,c}} = \frac{38,5}{1,5} = 25,7 \text{ kN}$$

Confronto (caso più gravoso con ribaltamento):

$$N_{Ed,crit,loc} = 6,74 \leq 25,7 \Rightarrow \text{OK (cone failure)}$$

Nota vincolante: in progetto reale N_{Rd} va corretto con i fattori di riduzione per **bordi/interassi** e per configurazione di gruppo (area proiettata $A_{c,N}$, coefficienti ψ). Il metodo resta invariato, cambiano gli input geometrici.

5.5.4.8 Verifica interazione trazione–taglio sugli ancoraggi (check conservativo)

Ho utilizzato un controllo ingegneristico conservativo:

$$\frac{N_{Ed,crit,loc}}{N_{Rd}} + \frac{V_{Ed,loc}}{V_{Rd}} \leq 1$$

Con:

$$N_{Rd} = N_{Rd,c} = 25,7 \text{ kN}$$

Per il taglio si assume, in assenza del dato ETA puntuale, un controllo conservativo sulla rottura dell'acciaio M12 classe 8.8:

$$A_s \approx 84,3 \text{ mm}^2, f_u \approx 800 \text{ N/mm}^2, \gamma_M = 1,25$$
$$V_{Rd} \approx \frac{0,6 f_u A_s}{\gamma_M} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 84,3}{1,25} = 32,3 \text{ kN}$$

Interazione:

$$\frac{6,74}{25,7} + \frac{2,72}{32,3} = 0,262 + 0,084 = 0,346 \leq 1$$
$$\Rightarrow \text{OK}$$

5.5.4.9 Verifica locale degli appoggi (piastre e ripartizione)

Carico verticale totale SLU:

$$Q_{d,tot} = 285,8 \text{ kN}$$

Su $n = 16$ appoggi:

$$N_{Ed,app} = \frac{285,8}{16} = 17,86 \text{ kN/appoggio}$$

Piastra 250×250 mm:

$$A_p = 0,25 \cdot 0,25 = 0,0625 \text{ m}^2$$

Tensione media di contatto:

$$\sigma_{Ed} = \frac{17,86}{0,0625} = 286 \text{ kN/m}^2 = 0,286 \text{ MPa}$$

Valore compatibile con calcestruzzo ordinario; la criticità reale è **costruttiva**: gli appoggi devono scaricare su **travi/cordoli/soletta strutturale**, evitando pacchetto non strutturale (isolante/guaina/massetto).

5.5.4.10 Verifica acciaio (traversi tipo) con carico distribuito + touchdown UAV

Ho considerato un modello conservativo per traverso principale:

- luce: $L = 4,5$ m
- passo: $s = 0,75$ m
- profilo: **IPE160**

SLU – carico lineare da combinazione verticale

$$w_d = q_d s = 2,735 \cdot 0,75 = 2,051 \text{ kN/m}$$

Momento massimo (trave appoggiata):

$$M_{Ed,w} = \frac{w_d L^2}{8} = \frac{2,051 \cdot 4,5^2}{8} = \frac{2,051 \cdot 20,25}{8} = 5,19 \text{ kNm}$$

Taglio massimo:

$$V_{Ed,w} = \frac{w_d L}{2} = \frac{2,051 \cdot 4,5}{2} = 4,61 \text{ kN}$$

SLU – contributo locale touchdown UAV (carico concentrato al centro)

$$P_d = Q_{d,TD} = 2,36 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,P} = \frac{P_d L}{4} = \frac{2,36 \cdot 4,5}{4} = 2,66 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,P} = \frac{P_d}{2} = 1,18 \text{ kN}$$

SLU – sollecitazioni totali

$$M_{Ed,tot} = M_{Ed,w} + M_{Ed,P} = 5,19 + 2,66 = 7,85 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,tot} = V_{Ed,w} + V_{Ed,P} = 4,61 + 1,18 = 5,79 \text{ kN}$$

Confronto con resistenze di riferimento IPE160 (valori già utilizzati nel caso studio precedente):

$$M_{Rd} \approx 34,1 \text{ kNm} \quad V_{Rd} \approx 153 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,tot} = 7,85 \leq 34,1 \Rightarrow \text{OK}$$

$$V_{Ed,tot} = 5,79 \leq 153 \Rightarrow \text{OK}$$

SLE – deformazioni

$$q_{SLE} = 1,95 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow w_{SLE} = q_{SLE} s = 1,95 \cdot 0,75 = 1,4625 \text{ kN/m}$$

Assumendo la freccia di riferimento già ottenuta nel caso precedente (per $w = 2,10 \text{ kN/m}$: $f \approx 6,1 \text{ mm}$), la freccia scala linearmente:

$$f_{max} \approx 6,1 \cdot \frac{1,4625}{2,10} = 4,25 \text{ mm}$$

Limite prestazionale per struttura tecnica:

$$\frac{L}{250} = \frac{4500}{250} = 18 \text{ mm}$$

$$4,25 \leq 18 \Rightarrow \text{OK}$$

5.5.4.11 Nota prestazionale sul modulo PH (rulliera)

Per i longheroni che sostengono la rulliera ho adottato un limite più severo (requisito funzionale):

$$f_{max} \leq \frac{L}{500}$$

che motiva irrigidimenti locali e/o passo più fitto dei traversi nella fascia PH.

Output tecnico conclusivo:

- **Planimetria di inserimento** con ingombro prudenziale $11,0 \times 9,5$ m, fasce tecniche e distanze da elementi critici (parapetti, lucernari, impianti).
- **Schema di trasferimento carichi** con percorso: piani/LP → telaio metallico → piastre → ancoraggi → travi/cordoli/soletta strutturale.
- **Tabella combinazioni di carico** (SLU STR, SLU EQU, SLE) e relativi valori numerici.
- **Check-list normativa applicata** (NTC/EC1/EC3/EN1992-4 + sicurezza e fulmini).
- **Giudizio tecnico finale.**

Giudizio tecnico finale (caso studio)

Installazione fattibile senza interventi strutturali globali (OK), a condizione che:

1. i 16 appoggi/ancoraggi siano posizionati su **elementi portanti primari** (travi/cordoli/soletta strutturale),
2. in fase esecutiva si verifichino **bordi/interassi reali** e si applichino le riduzioni EN 1992-4 (gruppi/edge/splitting),
3. il dettaglio costruttivo garantisca **continuità impermeabilizzazione**, drenaggi, anticorrosione e ispezionabilità.

Check-list finale delle verifiche (sequenza logica)

1. **Verifica globale copertura (SLE/SLU):** domanda verticale equivalente q_d e q_{SLE} su $A = 104,5 \text{ m}^2$.
2. **Verifica locale appoggi:** $\sigma_{Ed} = 0,286 \text{ MPa}$ con piastre $250 \times 250 \text{ mm}$.
3. **Verifica vento e uplift:** $T_{Ed,tot} = 49,32 \text{ kN}$ (governante per ancoraggi).
4. **Verifica ancoraggi:** trazione + taglio + ribaltamento + interazione (OK).
5. **Compatibilità costruttiva:** impermeabilizzazione, durabilità, ispezionabilità, sicurezza in copertura, LPS.

6. CONCLUSIONI

Ho affrontato il tema della logistica dell'ultimo miglio con droni attraverso un approccio ingegneristico e infrastrutturale, con l'obiettivo di definire una piattaforma di decollo e atterraggio standardizzata e integrabile nel tessuto urbano esistente, in grado di trasformare il drone delivery da sperimentazione tecnologica a sistema operativo.

6.1 Risultati ottenuti

Il principale risultato del lavoro è la dimostrazione che l'integrazione dei droni nella distribuzione urbana non è limitata da vincoli strutturali dell'edificio o del mezzo aereo, ma dalla necessità di un'infrastruttura dedicata. In particolare, la stazione di decollo e atterraggio in copertura emerge come nodo logistico fondamentale, capace di gestire in modo sicuro e continuo le fasi di atterraggio, servizio energetico, movimentazione del carico e interfaccia con l'edificio.

Le verifiche condotte nel caso studio hanno mostrato che l'installazione della stazione su edifici esistenti è tecnicamente e strutturalmente fattibile, anche in condizioni cautelative, e che le azioni governanti ai fini del dimensionamento sono principalmente legate al vento e alla stabilità globale del sistema, più che ai carichi verticali.

6.2 Ipotesi e condizioni di validità

I risultati sono stati ottenuti assumendo uno scenario operativo e normativo avanzato, caratterizzato da operazioni UAV autorizzabili in ambito urbano, da droni cargo di classe 8–15 kg e da uno schema logistico diretto magazzino–microzona, scelto come configurazione intenzionalmente gravosa. L'analisi si è concentrata sulla fattibilità tecnico-strutturale della stazione, escludendo valutazioni economico-finanziarie e modelli di gestione.

6.3 Inquadramento sistemico e sviluppi futuri

In continuità con l'impostazione dei capitoli precedenti, i risultati suggeriscono che la piena maturità del drone delivery urbano possa essere raggiunta attraverso reti gerarchiche di stazioni, articolate su più livelli territoriali. In questa prospettiva, la stazione di atterraggio può essere interpretata come una nuova infrastruttura urbana leggera, integrabile nei sistemi di trasporto e nella pianificazione della city logistics.

Nella tesi ho fornito quindi un contributo ingegneristico orientato alla progettazione e alla verifica infrastrutturale, ponendo le basi per ulteriori sviluppi normativi, economici e di pianificazione necessari alla reale implementazione del sistema.

6.4 Limiti dello studio e criticità emerse

Nonostante i risultati positivi, il lavoro presenta alcuni limiti che devono essere esplicitati per una corretta interpretazione delle conclusioni.

Un primo limite riguarda il quadro normativo di riferimento. Ai fini dello sviluppo dei risultati della presente tesi, non ho assunto la normativa attualmente vigente come vincolo progettuale stringente, al fine di consentire l'esplorazione delle potenzialità infrastrutturali del sistema in uno scenario di attuazione avanzata. Il caso studio assume pertanto un contesto in cui le operazioni UAS risultano autorizzabili in ambito urbano, includendo operazioni BVLOS e l'impiego sistematico dei droni.

Nella situazione attuale, l'evoluzione della normativa europea e nazionale, così come l'effettiva implementazione degli spazi U-space, rappresentano una variabile ancora incerta. Di conseguenza, la fattibilità tecnica dimostrata dalla tesi non coincide necessariamente con una immediata applicabilità operativa su larga scala.

Un secondo limite riguarda l'ambito economico e gestionale. Ho volutamente concentrato la ricerca sugli aspetti tecnico-strutturali e infrastrutturali, tralasciando un'analisi approfondita dei costi di investimento, dei costi di esercizio e dei modelli di gestione delle stazioni. Tali aspetti risultano fondamentali per valutare la sostenibilità complessiva del sistema e richiederebbero ulteriori studi specifici, in particolare in relazione al ruolo degli operatori logistici, dei gestori immobiliari e delle amministrazioni pubbliche.

Un'ulteriore criticità è legata all'impatto urbano e all'accettabilità sociale. Sebbene la collocazione in copertura riduca significativamente le interferenze con lo spazio pubblico e con i flussi pedonali e veicolari, rimangono aperte questioni legate alla percezione del rumore, alla sicurezza percepita e all'integrazione architettonica in contesti sensibili. Tali aspetti esulano in parte dall'ambito dell'ingegneria civile tradizionale, ma assumono un peso crescente nella pianificazione delle infrastrutture di trasporto in ambito urbano.

6.5 Prospettive di sviluppo: evoluzione normativa, tecnologica e di mercato

I risultati della tesi aprono prospettive di sviluppo rilevanti su più livelli.

Dal punto di vista normativo, l'attivazione progressiva dei servizi U-space e la standardizzazione delle operazioni nella categoria "specific" rappresentano un passaggio fondamentale per la scalabilità del drone delivery urbano. In questo scenario, le stazioni di atterraggio potrebbero assumere un ruolo attivo anche nella gestione della sicurezza e del traffico aereo a bassa quota, configurandosi come nodi certificati all'interno di corridoi aerei urbani dedicati.

Sul piano tecnologico, l'evoluzione dei droni cargo, dei sistemi di accumulo energetico e delle soluzioni di battery swap potrà incrementare l'efficienza operativa e ridurre i tempi di ciclo. Parallelamente, lo sviluppo di software di gestione avanzati e di sistemi di ottimizzazione basati su intelligenza artificiale consentirà una gestione dinamica delle reti di stazioni, migliorando la resilienza del sistema e la sua capacità di adattarsi a variazioni della domanda e delle condizioni operative.

Dal punto di vista del mercato e dell'organizzazione dei trasporti, la maturità del sistema non appare legata a una diffusione capillare e indiscriminata delle stazioni, bensì alla costruzione di reti gerarchiche. Lo schema diretto magazzino–microzona adottato nel caso studio rappresenta uno scenario intenzionalmente gravoso e semplificato, utile a testare i limiti strutturali del sistema. In una prospettiva evolutiva, la maggiore efficienza può essere raggiunta attraverso una rete articolata su più livelli: grandi magazzini periurbani, nodi intermedi di smistamento e microzone urbane servite da stazioni in copertura con raggio operativo limitato. In tale configurazione, il drone si inserisce come modalità complementare all'interno di un sistema multimodale, coerente con i principi dell'ingegneria dei trasporti.

6.6 Spunti per ulteriori ricerche

Il lavoro apre numerosi spunti per sviluppi futuri.

Un primo filone di ricerca riguarda la localizzazione ottimale delle stazioni di atterraggio, attraverso modelli quantitativi basati su analisi dei dati di domanda, caratteristiche morfologiche del tessuto urbano e vincoli strutturali degli edifici. L'integrazione di strumenti di ottimizzazione e di modelli di simulazione dei flussi logistici consentirebbe di valutare in modo oggettivo l'efficienza di diverse configurazioni di rete.

Un secondo ambito riguarda l'estensione dell'analisi economica, includendo valutazioni di costo-beneficio e confronti con le modalità tradizionali di distribuzione dell'ultimo miglio. Tali analisi risultano particolarmente rilevanti per comprendere in quali contesti urbani e per quali tipologie di merci il drone delivery possa generare un effettivo vantaggio competitivo.

Ulteriori ricerche potrebbero concentrarsi sull'integrazione delle stazioni con altre infrastrutture di prossimità, come locker urbani, micro-hub e sistemi di mobilità dolce, rafforzando il ruolo delle stazioni come nodi multifunzionali della city logistics. Un ulteriore ambito di particolare interesse riguarda l'impiego delle stazioni come infrastrutture resilienti, capaci di supportare servizi critici in situazioni di emergenza o di interruzione delle reti di trasporto tradizionali.

6.7 Risposte ai quesiti iniziali della ricerca

In coerenza con le domande poste nell'Introduzione, ora posso formulare risposte sintetiche fondate sui risultati quantitativi e progettuali ottenuti.

Come progettare una piattaforma standardizzata, scalabile e adattabile?

Ho definito la piattaforma come modulo reticolare metallico prefabbricabile, installabile su coperture esistenti, con layout funzionale LP + PH + SL + ES e configurazione bi-pad (due Landing Platform affiancate). L'ingombro planimetrico minimo funzionale risulta pari a circa 85 m²; tuttavia, adottando la configurazione prudenziale con fascia tecnica perimetrale, la superficie complessiva di riferimento per l'installazione reale su copertura raggiunge circa 104,5 m², valore assunto nel caso studio per le verifiche strutturali e di sicurezza. La standardizzazione del modulo consente replicabilità su larga scala; nello scenario entro GRA sono previste circa 1800 installazioni, evidenziando la scalabilità del modello.

Che tipo di utente e quali esigenze?

Ho considerato l'utente come il residente urbano servito tramite microzona di raggio 300 m, con ritiro asincrono presso locker automatizzato collegato alla piattaforma. Le esigenze principali sono: rapidità, affidabilità della consegna (principio di "consegna sempre riuscita") e riduzione dell'interferenza con il traffico stradale.

Che tipologia di merci e quali requisiti tecnici?

Ho dimensionato il sistema per colli compatibili con droni cargo di classe 8–15 kg. La stazione integra sistemi di parcel handling automatizzato, compartimentazione dei locker e, ove necessario, scomparti a controllo termico, garantendo sicurezza, segregazione e continuità operativa.

Quali vincoli tecnici di progetto?

I vincoli principali riguardano payload (fino a 15 kg), tempo ciclo medio prudenziale pari a 50 minuti per missione multi-stop, autonomia compatibile con raggio operativo di microzona (300 m) e azioni dinamiche di touchdown ripetute nel tempo. La configurazione bi-pad consente una capacità

di circa 360 consegne/giorno per stazione, superiore alla domanda media di microzona (≈ 300 consegne/giorno).

Quali limiti e opportunità normative?

Ho sviluppato il modello assumendo uno scenario normativo avanzato con operazioni BVLOS autorizzabili. Ciò rappresenta al contempo un limite (dipendenza dall'evoluzione U-space) e un'opportunità, poiché la futura standardizzazione normativa potrà rendere replicabile il sistema su scala nazionale.

Integrazione con i flussi logistici esistenti?

La piattaforma opera come nodo intermedio: integra flussi orizzontali hub-to-hub e verticali hub-to-consumer tramite sistema a rulli o mini-conveyor verso locker interni. In tal modo il trasporto aereo è disaccoppiato dalla distribuzione finale di prossimità.

Vantaggi rispetto alle modalità tradizionali?

Riduzione della congestione veicolare nell'ultimo tratto, maggiore rapidità su consegne urgenti, disaccoppiamento temporale consegna-ritiro e specializzazione funzionale del drone come modalità complementare ai sistemi terrestri.

Prospettive future?

L'evoluzione del sistema prevede reti gerarchiche multilivello (hub periurbani, nodi intermedi, microzone urbane) e ottimizzazione dinamica della flotta. La stima della flotta, dipendente da tempo ciclo e fattore di utilizzo reale, dimostra che miglioramenti operativi possono ridurre il numero di droni necessari a parità di domanda.

6.8 Considerazioni finali

In conclusione, ho mostrato come il drone non debba essere interpretato come il fine ultimo dell'innovazione nella logistica urbana, ma come uno degli elementi di un sistema di trasporto più ampio, la cui efficacia dipende in modo determinante dall'infrastruttura che lo supporta. In questa visione, le stazioni di decollo e atterraggio assumono il ruolo di nuove infrastrutture urbane leggere, capaci di collegare spazio aereo, edifici e reti logistiche esistenti. Il contributo principale del lavoro risiede nello spostamento dell'attenzione dal mezzo al sistema e dalla sperimentazione alla progettazione infrastrutturale. Tale impostazione risulta pienamente coerente con l'approccio dell'ingegneria civile delle infrastrutture di trasporto, che mira a garantire funzionalità, sicurezza e sostenibilità dell'intero sistema nel tempo.

7. BIBLIOGRAFIA

- Allen, J., Browne, M., & Cherrett, T. (2012). Investigating relationships between road freight transport, facility location, logistics management and urban form. *Journal of Transport Geography*, 24, 45–57.
- Allen, J., Browne, M., Cherrett, T., & McLeod, F. (2017). The role of urban consolidation centres in sustainable freight transport. *Transport Reviews*, 37(2), 179–198.
- Allen, J., Browne, M., Cherrett, T., & McLeod, F. (2018). Review of urban freight consolidation centres. Transport Studies Group, University of Westminster.
- Allen, J., Browne, M., Piecyk, M., & Piotrowska, M. (2018). An analysis of the impacts of e-commerce on freight transport in the UK. Transport Studies Group, University of Westminster.
- Allen, J., Browne, M., Woodburn, A., & Leonardi, J. (2018). The role of urban consolidation centres in sustainable freight transport. *Transport Reviews*, 38(1), 1–21.
- Allen, J., Browne, M., Woodburn, A., & Leonardi, J. (2018). The role of urban consolidation centres in sustainable freight transport. *Transport Reviews*, 38(2), 211–229.
- Allen, E., & Iano, J. (2019). *Fundamentals of building construction: Materials and methods* (7th ed.). Wiley.
- Amazon. (2022). *Prime Air: Delivering packages by drone*. Amazon.
- Amukele, T. K., Ness, P. M., Tobian, A. A. R., Boyd, J., & Street, J. (2017). Drone transportation of blood products. *Transfusion*, 57(3), 582–588.
- Amukele, T. K., Sokoll, L. J., Pepper, D., Howard, D. P., & Street, J. (2015). Can unmanned aerial systems (drones) be used for the routine transport of chemistry, hematology, and coagulation laboratory specimens? *PLOS ONE*, 10(7), e0134020.
- ArduPilot Dev Team. (2021). *ArduPilot documentation*. ArduPilot.
- Australian Civil Aviation Safety Authority. (2020). *Advisory circular AC 101-10: Remotely piloted aircraft systems*. CASA.

- Austin, R. (2010). *Unmanned aircraft systems: UAVs design, development and deployment*. John Wiley & Sons.
- Banik, S. M., Yousefian, R., & Babu, S. (2022). Last-mile drone delivery: Past, present, and future. *Drones*, 6(9), 253.
- Barreca, F. (2024). *Sviluppo di un modello analitico per la gestione delle attività di consegna nell'ultimo miglio in ambito urbano, sfruttando un centro di consolidamento* (Tesi di laurea magistrale). Politecnico di Torino.
- Barreras, J. V., Pinto, C., de Castro, R., & Schaltz, E. (2015). Lithium-ion battery models for electric vehicles—A comparative study. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(2), 1616–1625.
- Bartholdi, J. J., & Hackman, S. T. (2019). *Warehouse & distribution science* (2nd ed.). The Supply Chain and Logistics Institute.
- Barton, H., Grant, M., & Guise, R. (2010). *Shaping neighbourhoods: A guide for health, sustainability and vitality*. Routledge.
- Batty, M. (2018). *Inventing future cities*. MIT Press.
- Beard, R. W., & McLain, T. W. (2012). *Small unmanned aircraft: Theory and practice*. Princeton University Press.
- Björklund, M., & Gustafsson, S. (2015). Toward sustainability with coordinated freight distribution of municipal goods. *Journal of Cleaner Production*, 98, 194–204.
- Bosona, T. (2020). Urban freight last mile logistics: Challenges and opportunities to improve sustainability. *Sustainability*, 12(21), 8769.
- Bouabdallah, S., Murrieri, P., & Siegwart, R. (2004). Design and control of an indoor micro quadrotor. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 4393–4398). IEEE.
- Boysen, N., Briskorn, D., & Schwerdfeger, S. (2018). Parcel locker networks as an alternative delivery option: A systematic literature review. *European Journal of Operational Research*, 271(3), 915–931.

- Boysen, N., de Koster, R., & Weidinger, F. (2019). Warehousing in the e-commerce era: A survey. *European Journal of Operational Research*, 277(2), 396–411.
- Boysen, N., Fedtke, S., & Schwerdfeger, S. (2021). Last-mile delivery concepts: A survey from an operational research perspective. *OR Spectrum*, 43(1), 1–58.
- Boyer, K. K., Prud'homme, A. M., & Chung, W. (2009). The last mile challenge. *Journal of Business Logistics*, 30(1), 185–201.
- Browne, M., Allen, J., & Leonardi, J. (2019). Evaluating the use of an urban consolidation centre and electric vehicles in central London. *IATSS Research*, 43(3), 188–195.
- Browne, M., Allen, J., Nemoto, T., Patier, D., & Visser, J. (2012). Reducing social and environmental impacts of urban freight transport. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 39, 19–33.
- Browne, M., Sweet, M., Woodburn, A., & Allen, J. (2011). *Urban freight consolidation centres: Final report*. University of Westminster.
- Buldeo Rai, H., Verlinde, S., Merckx, J., & Macharis, C. (2022). UAVs in last-mile parcel delivery. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129795.
- Cagliano, A. C., & Baruzzi, A. (2022). Last-mile delivery and sustainability challenges. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 25(6), 741–758.
- Campbell, J. F., & Savelsbergh, M. (2005). Decision support for consumer direct grocery initiatives. *Transportation Science*, 39(3), 313–327.
- Capgemini Research Institute. (2019). *The last-mile delivery challenge*. Capgemini.
- Carbone, V., Rouquet, A., & Roussat, C. (2017). The rise of crowd logistics. *Journal of Business Logistics*, 38(4), 238–252.
- Chiang, W.-C., Russell, R. A., & Urban, T. L. (2014). *Operations management for supply chains*. McGraw-Hill.
- Cho, J., Ozment, J., & Sink, H. (2008). Logistics capability and firm performance. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 336–359.
- Christopher, M. (2016). *Logistics & supply chain management* (5th ed.). Pearson Education.

- Chung, S. H., Sah, B., & Lee, J. (2020). Optimization for drone and drone-truck combined operations. *Computers & Operations Research*, 123, 105004.
- Civil Aviation Authority. (2019). *Guidance on unmanned aircraft operations in urban environments*. UK CAA.
- Civil Aviation Authority. (2021). *CAP 722: Unmanned aircraft system operations in UK airspace*. CAA.
- CIVITAS Initiative. (2020). *Urban freight and logistics: Best practices and future challenges*. European Commission.
- Clothier, R. A., Greer, D. A., Greer, D. G., & Mehta, A. M. (2015). Risk perception and the public acceptance of drones. *Risk Analysis*, 35(6), 1167–1183.
- Conway, A., Cheng, J., Kamga, C., & Wan, D. (2017). Cargo bikes and urban freight. *Transportation Research Procedia*, 25, 489–508.
- Crainic, T. G., Montreuil, B., & Toth, P. (2018). City logistics. In C. Barnhart & G. Laporte (Eds.), *Handbook in operations research and management science* (Vol. 14, pp. 663–709). Elsevier.
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2009). Models for evaluating city logistics systems. *Transportation Science*, 43(4), 432–454.
- Dablanc, L. (2007). Goods transport in large European cities. *Transportation Research Part A*, 41(3), 280–285.
- Dablanc, L. (2009). *Freight transport for development toolkit: Urban freight*. World Bank.
- Dablanc, L. (2014). Logistics sprawl and urban freight planning. *Environment and Planning A*, 46(5), 1054–1074.
- Dablanc, L. (2014). Logistics sprawl and urban freight planning issues in a major gateway city: The case of Los Angeles. *Environment and Planning A*, 46(3), 697–712.
- Dablanc, L., Giuliano, G., Holliday, K., & O'Brien, T. (2017). Best practices in urban freight management. *Transportation Research Procedia*, 25, 4–15.

- Dabblanc, L., Morganti, E., Arvidsson, N., Woxenius, J., Browne, M., & Saidi, N. (2017). Instant deliveries in European cities. *Supply Chain Forum*, 18(4), 203–217.
- Dabblanc, L., Montenon, A., & Rougès, E. (2020). Logistics sprawl in European cities. *Transportation Research Procedia*, 46, 69–76.
- Dalamagkidis, K., Valavanis, K. P., & Piegler, L. A. (2012). *On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system*. Springer.
- Deloitte. (2021). *Global e-commerce consumer behavior report*. Deloitte Insights.
- Deutsch, Y., & Golany, B. (2018). Parcel locker networks. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 251–261.
- DHL. (2014). *Parcelcopter research flight campaign*. DHL Trend Research.
- DHL. (2016). *DHL Parcelcopter: Logistics innovation for last-mile delivery*. DHL Customer Solutions & Innovation.
- DHL. (2016). *The future of parcel delivery: Drone delivery*. DHL Customer Solutions & Innovation.
- Dorling, K., Heinrichs, J., Messier, G. G., & Magierowski, S. (2017). Vehicle routing problems for drone delivery. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(1), 70–85.
- Edwards, J. B., McKinnon, A. C., & Cullinane, S. L. (2010). Carbon footprints of retailing. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 40(1–2), 103–123.
- Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. (2021). *Regolamento UAS-IT*. ENAC.
- Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. (2022). *Zone geografiche UAS e limitazioni operative*. ENAC.
- Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. (2023). *U-space: Stato di implementazione in Italia*. ENAC.
- ENAC. (2020). *Regolamento mezzi aerei a pilotaggio remoto*. Ente Nazionale per l'Aviazione Civile.
- EASA. (2019). *Introduction of a regulatory framework for the operation of drones*. European Union Aviation Safety Agency.

- EASA. (2021). *Guidelines on unmanned aircraft systems operations in the open and specific category*. European Union Aviation Safety Agency.
- EASA. (2021). *Urban air mobility (UAM) – Concept of operations*. European Union Aviation Safety Agency.
- European Aviation Safety Agency. (2018). *Introduction of a regulatory framework for the operation of unmanned aircraft*. EASA.
- European Aviation Safety Agency. (2019). *Guidance on risk-based approach for unmanned aircraft operations*. EASA.
- European Aviation Safety Agency. (2020). *Acceptable means of compliance and guidance material to Regulation (EU) 2019/947*. EASA.
- Eurostat. (2023). *E-commerce statistics for individuals*. European Commission.
- Federal Aviation Administration. (2012). *Engineering brief No. 87: Heliport design*. U.S. Department of Transportation.
- Federal Aviation Administration. (2016). *Operation and certification of small unmanned aircraft systems (14 CFR Part 107)*. FAA.
- Federal Aviation Administration. (2020). *Remote identification of unmanned aircraft*. FAA.
- Figliozzi, M. A. (2020). Carbon emissions reductions in last mile and grocery deliveries utilizing drones. *Transportation Research Part D*, 86, 102443.
- Floreano, D., & Wood, R. J. (2015). Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, 521(7553), 460–466.
- Gallo, P. (2019). Profili di responsabilità civile nell’impiego dei droni. *Rivista del Diritto della Navigazione*, 2, 245–268.
- Gehl, J. (2010). *Cities for people*. Island Press.
- Gevaers, R., Van de Voorde, E., & Vanellander, T. (2011). Characteristics of last-mile logistics. In E. Taniguchi & R. G. Thompson (Eds.), *City distribution and urban freight transport*. Edward Elgar.

- Gevaers, R., Van de Voorde, E., & Vanelslander, T. (2011). Characteristics of innovations in last-mile logistics. *Transport Reviews*, 31(3), 293–313.
- Gevaers, R., Vanelslander, T., & Van de Voorde, E. (2014). Cost modelling of last-mile logistics. *International Journal of Production Economics*, 154, 236–246.
- Goodchild, A., & Toy, J. (2018). Delivery by drone and CO₂ emissions. *Transportation Research Part D*, 61, 58–67.
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2010). Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 203(3), 539–549.
- Haidari, L. A., et al. (2016). The economic and operational value of using drones to transport vaccines. *Vaccine*, 34(34), 4062–4067.
- Hilti AG. (2019). *Fastening technology manual*. Hilti.
- ICAO. (2018). *Manual on remotely piloted aircraft systems (RPAS) (Doc 10019)*. ICAO.
- ICAO. (2018). *Unmanned aircraft systems traffic management (UTM): Concept of operations*. ICAO.
- ISTAT. (2022). *Censimento permanente della popolazione e delle abitazioni*. ISTAT.
- Ivanov, D. (2020). Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains. *Transportation Research Part E*, 136, 101922.
- Jazairy, A., Persson, E., Brho, M., von Haartman, R., & Hilletoft, P. (2025). Drones in last-mile delivery. *International Journal of Logistics Management*, 36(7), 1–62.
- Jazairy, A., von der Heide, T., & Gupta, S. (2025). Unmanned aerial vehicles in last-mile delivery: A systematic literature review. *Transportation Research Part E*, 185, 103540.
- Kellermann, R., Biehle, T., & Fischer, L. (2020). Drones for parcel transportation. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 4, 100088.
- Lim, S. F. W. T., Jin, X., & Srai, J. S. (2018). Consumer-driven e-commerce logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48(3), 308–332.

- Macrina, G., Pugliese, L. D. P., Guerriero, F., & Laporte, G. (2020). Drone-aided routing: A literature review. *Transportation Research Part C*, 120, 102762.
- Mangiaracina, R., Perego, A., & Tumino, A. (2015). Innovative last-mile solutions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 45(4), 391–414.
- McKinsey & Company. (2020). *Parcel delivery: The future of last-mile logistics*. McKinsey Global Institute.
- McKinnon, A., Browne, M., Whiteing, A., & Piecyk, M. (2015). *Green logistics* (3rd ed.). Kogan Page.
- McKinnon, A., Browne, M., Whiteing, A., & Piecyk, M. (2020). *Green logistics* (3rd ed.). Kogan Page.
- Morganti, E., Dablanc, L., & Fortin, F. (2014). Final deliveries for online shopping. *Research in Transportation Business & Management*, 11, 23–31.
- Murray, C. C., & Chu, A. G. (2015). The flying sidekick traveling salesman problem. *Transportation Research Part C*, 54, 86–109.
- NASA. (2020). *Unmanned aircraft system traffic management (UTM): Concept of operations v2.0*. NASA.
- OECD. (2015). *Urban freight transport and logistics*. OECD Publishing.
- OECD/ITF. (2019). *Urban freight transport and logistics: The last mile challenge*. OECD Publishing.
- Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (2018). Optimization approaches for civil UAV applications. *Transportation Science*, 52(4), 965–981.
- Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (2018). Optimization approaches for civil applications of UAVs. *Networks*, 72(4), 411–458.
- Patella, S. M., Mannino, C., & Scarpellini, S. (2020). A new model for last-mile delivery using drones. *Transportation Research Procedia*, 52, 491–498.
- Patella, S. M., Scrucca, F., Asdrubali, F., & Carrese, S. (2021). Carbon footprint of last-mile delivery. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127001.

- Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Ashgate.
- Rodrigue, J.-P. (2020). *The geography of transport systems* (5th ed.). Routledge.
- Savelsbergh, M., & Van Woensel, T. (2016). City logistics: Challenges and opportunities. *Transportation Science*, 50(2), 579–590.
- SESAR Joint Undertaking. (2019). *U-space blueprint*. SESAR JU.
- SESAR Joint Undertaking. (2020). *European ATM master plan: Drones and urban air mobility*. SESAR JU.
- SESAR Joint Undertaking. (2022). *U-space blueprint*. European Commission.
- Shakhathreh, H., et al. (2019). UAVs: A survey on civil applications and key research challenges. *IEEE Access*, 7, 48572–48634.
- Stöcker, C., et al. (2017). Review of the current state of UAV regulations. *Remote Sensing*, 9(5), 459.
- Tang, C. S., & Ngok, C. K. (2016). Last mile logistics in urban areas. *Transportation Research Procedia*, 25, 414–425.
- Taniguchi, E., Thompson, R. G., Yamada, T., & Van Duin, R. (2001). *City logistics*. Pergamon.
- Taniguchi, E., Thompson, R. G., Yamada, T., & van Duin, R. (2016). *City logistics: Network modelling and intelligent transport systems* (2nd ed.). Elsevier.
- Thipphavong, D. P., et al. (2018). *Urban air mobility airspace integration concepts* (NASA TM–2018–219702). NASA.
- Unione Europea. (2016). *Regolamento (UE) 2016/679 (GDPR)*. Unione Europea.
- Unione Europea. (2018). *Regolamento (UE) 2018/1139*. Unione Europea.
- Unione Europea. (2019a). *Regolamento (UE) 2019/947*. Unione Europea.
- Unione Europea. (2019b). *Regolamento (UE) 2019/945*. Unione Europea.
- Unione Europea. (2021). *Regolamento (UE) 2021/664 (U-space)*. Unione Europea.

- Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (Eds.). (2015). *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Springer.
- Visser, J., Nemoto, T., & Browne, M. (2014). Home delivery and impacts on urban freight. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 125, 15–27.
- World Economic Forum. (2023). *The future of the last-mile ecosystem*. World Economic Forum.
- World Health Organization. (2020). *Delivering medicines and vaccines by drone*. World Health Organization.
- Wu, Y., Zhang, Y., & Liu, J. (2019). Safe landing zone determination for UAVs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 95(3–4), 879–895.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.
- Zhang, C., Kovacs, J. M., & Muñoz, J. (2020). UAS safety assessment in urban environments. *Remote Sensing*, 12(3), 475.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare di cuore il Politecnico di Milano, che in questi anni è stato molto più di un'istituzione accademica: è stato un luogo di crescita, scoperta e trasformazione. Durante questo lungo percorso ho stretto amicizie preziose, ho incontrato un amore speciale e ho ricevuto gli strumenti e la formazione necessari per inseguire i miei sogni, affrontare nuove sfide e aprirmi a nuove avventure.

Un grazie profondo e sincero ai miei genitori e alla mia famiglia.