

MODELLO DI SIMULAZIONE PER LO STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE DI SISTEMI LOGISTICI PER LE CONSEGNE DELL’ULTIMO MIGLIO TRAMITE DRONI

Lorenzo Rubrichi*, Maria Grazia Gnoni*, **, Fabiana Tornese*

* PRISCO LAB, Dipartimento di Ingegneria dell’Innovazione, Università del Salento,

lorenzo.rubrichi@unicampania.it, fabiana.tornese@unisalento.it

**Professore ordinario, Dipartimento di Ingegneria dell’Innovazione, Università del Salento, mariagrazia.gnoni@unisalento.it

SOMMARIO

La complessità della gestione delle attuali attività logistiche dell’ultimo miglio sta aumentando a causa di diversi fattori, a partire dall’incertezza nella domanda dei clienti fino ai vincoli dovuti all’accesso alle aree urbane. Stanno emergendo nuovi modelli di consegna dell’ultimo miglio che si basano su tecnologie intelligenti dedicate, come ad esempio consegne con sistemi autonomi p.e. terrestri e/o aerei. Questo studio si concentra sull’analisi delle tecnologie di consegna autonoma nella logistica dell’ultimo miglio e propone una valutazione sulle loro prestazioni sia dal punto di vista economico sia ambientale. Dopo una ricognizione della letteratura in tema di logistica dell’ultimo miglio, si è pervenuti alla definizione di un modello quantitativo integrato, in cui vengono presi in considerazione i costi e le prestazioni ambientali. Infine, viene proposta un’analisi di scenario attraverso il confronto di diverse tecnologie di consegna autonoma che potrebbero essere adottate nella logistica dell’ultimo miglio. È qui inoltre proposto un caso di test in condizioni diverse per validare il modello. I risultati mostrano come l’erogazione di servizi basati su droni potrebbe contribuire a ridurre gli impatti sia in termini economici sia in termini ambientali e che l’adozione di robot di consegna autonomi potrebbe costituire una soluzione praticabile e vincente soprattutto in condizioni di traffico estremo.

1. INTRODUZIONE

La consegna dell’ultimo miglio è attualmente il segmento più “inefficiente” dell’intera catena di fornitura, perché nonostante rappresenti meno del 5% della distanza totale per consegnare la merce ai clienti, il tempo medio di trasporto è di circa 5 ore [1]; inoltre, la consegna dell’ultimo miglio contribuisce con il fattore di costo più elevato (circa il 70%) all’interno dei costi logistici totali [2]. Dal punto di vista ambientale, secondo [3], le emissioni globali di CO₂ del settore dei trasporti sono aumentate nuovamente nel 2021, dell’8% a quasi 7,7 Gtonn_{CO2}, rispetto a 7,1 Gtonn_{CO2} nel 2020, di cui quasi il 10% a causa del sistema di consegna logistica. Inoltre, i trasporti dipendono ancora per il 91% dai prodotti petroliferi, con una diminuzione del solo 3% rispetto all’inizio degli anni ’70. Questi dati confermano il ruolo critico della logistica dell’ultimo miglio, come fonte rilevante di impatti sia dal punto di vista economico che ambientale. Numerosi sforzi di ricerca e politica sono stati orientati a ridurre questo impatto valutando nuovi modelli, strategie e strumenti operativi da adottare in questo processo. Un contributo importante potrebbe derivare dalle nuove tecnologie *smart*, per le consegne autonome. Queste tecnologie includono robot di consegna autonomi (ADR) e veicoli aerei senza pilota (UAV), che potrebbero essere utilizzati per le consegne dell’ultimo miglio e per le attività di riconsegna. Questo lavoro si concentra sulla valutazione del po-

tenziale contributo di queste due tecnologie – come droni e robot di consegna – al fine di migliorare il livello di sostenibilità generale della logistica dell’ultimo miglio. Questi sistemi offrono numerosi vantaggi:

- tempi di consegna brevi [4] [5],
- riduzione delle emissioni [6] [7]
- riduzione dei costi [8] [9] [10]
- indirettamente, migliori condizioni del traffico.

Vi sono però alcune criticità da considerare, quali:

- la necessità di prevedere strutture di decollo e atterraggio[11] o strutture dedicate al traffico,
- la presenza di *no-fly zone* in caso di utilizzo di droni,
- l’impossibilità di volare in condizioni meteorologiche estremamente avverse,
- un basso fattore di carico massimo
- la necessità di rientrare all’*hub* dopo ogni consegna, che non consente l’adozione di rotte ottimizzate.

Inoltre, la letteratura su questi argomenti è ancora scarsa: esistono ancora applicazioni prototipali in tutto il mondo.

Questo studio mira a riempire questo divario analizzando la letteratura attuale, e, proponendo un modello per l’integrazione degli impatti economici e ambientali per la gestione delle consegne con sistemi autonomi.

Il lavoro è strutturato come segue, nella sezione 2 viene proposta un’analisi critica della letteratura scientifica; successivamente, il modello proposto per

la valutazione degli impatti ambientali e economici di sistemi autonomi nella consegna dell'ultimo miglio è dettagliato nella terza sezione; infine, nella quarta sezione viene presentato e discusso un *test case*.

2. STATO DELL'ARTE

L'analisi della letteratura proposta evidenzia come le tecnologie intelligenti emergenti vengano applicate nella logistica dell'ultimo miglio. Le tecnologie intelligenti analizzate influenzano sia le procedure di consegna (ad esempio, armadietti per pacchi e logistica dei corvi), sia i mezzi di consegna (veicoli elettrici, veicoli aerei senza equipaggio e robot di consegna autonomi).

A. Parcel locker

La consegna presso i *parcel locker* è una tendenza in aumento nei servizi di consegna dell'ultimo miglio. Un *parcel locker* è un gruppo di scomparti pubblici, sicuri e automatizzati che i clienti possono utilizzare come punto di raccolta self-service al posto del proprio indirizzo di casa. Gli obiettivi più comuni dei lavori su questo tema si concentrano principalmente, da un lato, sulla definizione dei fattori di soddisfazione del cliente; dall'altro, su quella dei modelli di pianificazione degli armadietti per ottimizzare obiettivi specifici (p.e., riduzione dei costi, risoluzione del chilometraggio, riduzione delle emissioni). Nel primo gruppo, in [12] gli autori hanno sviluppato un sondaggio per definire cinque dimensioni - tangibilità, reattività, sicurezza, affidabilità e puntualità - che possono influenzare positivamente la soddisfazione del cliente adottando il *locker* per le consegne. In [13] gli autori hanno definito i fattori d'influenza più rilevanti sulla base dell'analisi di un sondaggio: "convenienza", "sicurezza", "privacy" e "vantaggio relativo percepito".

Analizzando il secondo argomento volto a ottimizzare una rete di distribuzione basata sugli armadietti per ritiro pacchi, vari studi hanno proposto diverse funzioni obiettivo sviluppate utilizzando approcci diversi.

Alcuni studi hanno adottato modelli di simulazione per progettare il numero e la posizione degli armadietti sulla base di dati reali [14], [15].

Altri studi hanno adottato modelli tradizionali – il TSP (*Travel Salesman Problem*) – per progettare il servizio con i *locker* valutando le finestre temporali di consegna [16], al fine di migliorare le prestazioni di consegna, ridurre le emissioni o abbassare i costi complessivi. Hanno dimostrato [17] che progettare e gestire una rete di armadietti, secondo il modello TSP, può portare ad una riduzione dei costi totali fino al 55% e a una riduzione delle emissioni fino al 51,2%.

B. Logistica condivisa (crowd logistics)

Tra i nuovi modelli di consegna, sta emergendo un nuovo paradigma in cui la consegna tradizionale delle merci viene integrata o sostituita da soggetti non professionisti coinvolti in attività logistiche (ad esempio privati cittadini) disposti a integrare le attività di spedizione nei propri itinerari. Le attività di consegna sono assegnate a questi "spedizionieri occasionali", che ricevono un compenso economico [18].

Studi recenti hanno analizzato i risultati di questo modello logistico dell'ultimo miglio: [19] hanno confrontato i vantaggi di tre tipi di flotte di consegna in *crowdsourcing* che potrebbero essere implementate in un contesto urbano: flotte di corrieri in bicicletta, flotte di corrieri in auto e flotte ibride.

I risultati hanno mostrato che le flotte di biciclette in *crowdsourcing* hanno prestazioni migliori rispetto ad altri tipi di flotte in condizioni specifiche.

Un altro problema è la stima del compenso del corriere, integrato con i costi dei ricercatori della rete di distribuzione tradizionale [20]. In [21] gli autori hanno discusso i potenziali benefici che originavano da una riduzione delle emissioni, da una minore congestione nelle città e, cosa più importante; da un maggiore sicurezza della consegna.

La principale criticità è stata quella di valutare con precisione l'introduzione di risarcimenti per i vettori, che non superassero il costo totale del caso in assenza di *crowd logistic*. Nello specifico, in [22] gli autori hanno condotto uno studio per valutare le soglie di compensazione in base alla domanda e alla composizione della flotta di consegna.

C. Veicoli elettrici

Negli ultimi anni l'adozione di veicoli elettrici nella logistica dell'ultimo miglio si è diffusa in tutto il mondo a causa delle problematiche ambientali. Uno dei principali ostacoli menzionati in letteratura è l'elevato costo di investimento iniziale come discusso in [23], dove l'elevato costo di investimento dovuto al prezzo di acquisto è stato compensato da minori costi operativi richiesti dai veicoli elettrici rispetto a quelli tradizionali. Nello stesso lavoro [24] sono stati discussi anche i costi operativi, compresi i costi di manutenzione e riparazione. Nel dettaglio, i costi di manutenzione e riparazione di un veicolo elettrico sono inferiori di circa il 40% rispetto a quelli di un veicolo con motore a combustione tradizionale. Inoltre, i costi energetici totali per i veicoli elettrici sono inferiori di circa il 60% rispetto ai costi del carburante tradizionale. Vi è anche la possibilità che i veicoli elettrici beneficino di minori costi assicurativi.

Un'ulteriore criticità da valutare è la durata della batteria, spesso considerata insufficiente per lo sviluppo degli ordini soprattutto in ambito logistico.

Uno studio recente ha proposto un caso di studio sull'adozione di veicoli elettrici [25] integrando flussi logistici diretti e inversi.

D. Droni

I droni – definiti anche come *Unmanned Aerial Vehicles* – da utilizzarsi per le consegne sono piccoli veicoli che utilizzano un motore elettrico e ali rotanti o fisse per consegnare i pacchi precedentemente ritirati presso un *hub* locale direttamente presso il cliente finale.

In [26], gli autori elencano alcuni vantaggi della consegna dell'ultimo miglio con i droni. Questi

- hanno una velocità propria più elevata
- costi unitari inferiori,
- non richiedono alcun intervento manuale durante il volo,
- non dipendono dalle condizioni del traffico
- garantiscono con il loro utilizzo evidenti benefici ambientali.

Quando si implementa la consegna dell'ultimo miglio con i droni, i problemi da risolvere sono tuttavia molteplici [27]. Tra questi si evidenziano:

- l'utilizzo dello spazio aereo,
- la pianificazione della capacità di carico,
- la gestione del pilotaggio da remoto in aree con morfologia complessa.

Lo studio [28] modella un VRPD o un "*Vehicle Routing Problem With Drones*", ovvero un VRP classico in cui alcune destinazioni di consegna siano state coperte dalla consegna con droni. Lo studio confronta il caso della consegna tradizionale con quello della consegna con droni in combinazione con furgoni o camion e ottiene come risultato un miglioramento dell'attuale sistema di consegna utilizzando un singolo camion in combinazione con un drone.

In [29], viene proposta la modellazione del problema del commesso viaggiatore in uno scenario con droni accoppiati con un camion per valutare come l'introduzione della consegna con droni influisca sulle prestazioni della rete quando cambiano le condizioni operative.

In [30] è stato studiato un sistema di consegna con droni in cui questi decollano da "alveari" e consegnano direttamente all'indirizzo finale.

Lo studio ha esaminato dove posizionare le arnie, scegliendo luoghi che consentissero di costruire la struttura al minor costo e al contempo servire il maggior numero di clienti.

E. Robot di consegna autonomi

I robot di consegna autonomi (*Autonomous Delivery systems*, ADR) sono piccoli veicoli elettrici che consentono il trasporto di merci nella logistica dell'ultimo miglio senza alcun intervento umano.

Un operatore può monitorare e assumere il controllo

del robot da remoto in determinate situazioni nelle quali il robot non sia in grado di trovare una soluzione da solo.

I veicoli autonomi possono disporre di un numero variabile di ruote e di un box per riporre la merce. Le principali innovazioni nell'uso dei robot di consegna potrebbero essere la riduzione delle emissioni e la riduzione dei costi di investimento. In [31] gli autori hanno sottolineato che il principale vantaggio competitivo degli ADR rispetto ad altre modalità di consegna è il loro costo.

Dal punto di vista ambientale, l'uso degli ADR potrebbe contribuire a ridurre le emissioni: un recente studio [32] ha proposto il confronto tra veicoli tradizionali, veicoli elettrici e ADR ottenendo per gli ADR il miglior risultato anche in combinazione con veicoli elettrici.

3. IL MODELLO SVILUPPATO

L'obiettivo di questa parte del lavoro è legato allo sviluppo di un modello per la valutazione delle prestazioni economiche e ambientali di diversi sistemi applicati per la logistica dell'ultimo miglio da quelli tradizionali a quelli basati su tecnologie intelligenti.

Per la validazione del modello, vengono poi valutati diversi scenari basati sulle caratteristiche del contesto urbano (ad esempio traffico, infrastrutture disponibili) in diverse condizioni operative e della domanda dei clienti.

Al fine di confrontare soluzioni alternative di logistica dell'ultimo miglio inizialmente è stata definita una serie di indicatori chiave di prestazione indicati di seguito

1) Indicatori di efficacia del servizio:

- a) Costo unitario di consegna [€/paccho];
- b) Tasso di consegna [numero di pacchi/h].

2) Indicatori ambientali:

- c) Energia utilizzata per la consegna [kWh/consegna];
- d) Emissioni di CO₂ (kg_{CO₂,eq} per consegna);

Successivamente è stata definita la funzione di costo totale, T_{yc} , dettagliata di seguito:

$$T_{yc} = \sum_{i=1}^I N_i * (a_i + e_{q_i} + m_i + ins_i + f_i + t_i) + \sum_{j=1}^J M_j * (s_j * H) + \sum_{i=1}^I (en_i * cc_i) + (p_{ret} * c_{ret} + p_{fd} * c_{fd}) \quad (1)$$

dove:

$$m_{ij} = A * m_{fo_{ij}} + B * m_{t_{ij}} + C * m_{b_{ij}} + m_{bc_{ij}} \quad (2)$$

$$en_i = \frac{TD_i}{vm_i} * \tau * Pm_i \quad (3)$$

L'indice i rappresenta la tipologia del sistema tecnologico adottato per il servizio di consegna e assume i seguenti valori:

- $i = 1$ se la consegna è effettuata con furgoni alimentazione tradizionale;
- $i = 2$ se la consegna viene effettuata con furgoni elettrici;
- $i = 3$ se la consegna è effettuata tramite droni;
- $i = 4$ se la consegna è effettuata da veicoli terrestri autonomi.

L'indice j definisce la tipologia dell'operatore, che è strettamente dipendente dal tipo di tecnologie di consegna adottata: I suoi valori sono:

- $j = 1$ se si riferisce all'autista di un furgone.
- $j = 2$ se si riferisce solo a specifici operatori che realizzano il carico e scarico per sistemi di consegna senza equipaggio.
- $j = 3$ se ad operatori specializzati che controllano da remoto i veicoli senza pilota (droni e veicoli terrestri). Si è ipotizzato che un operatore possa gestire dieci veicoli alla volta.

I significati delle altre variabili presenti delle equazioni (1), (2) e (3) sono riportati nella Tabella 1.

Tabella 1. Parametri introdotti nel modello quantitativo).

Parametro	Descrizione
H	Durata turno operatore su base annuale (es. 8 ore al giorno per 250 giorni).
P_{ret}	Probabilità di reso prodotto
P_{rd}	Probabilità di mancata consegna
$m_{fo_{ij}}$	Costi totali di manutenzione per veicoli con motori endotermici (p.e cambio olio motore, filtri olio [€ ad intervento]).
$m_{b_{ij}}$	Costi di manutenzione o sostituzione della batteria [€ ad intervento].
$m_{t_{ij}}$	Spese totali di manutenzione o sostituzione ruote e pneumatici [€ad intervento].
$m_{bc_{ij}}$	Costi per pezzi di ricambio, costi per manutenzione o sostituzione di componenti danneggiati [€].
TD_j	Distanza totale percorsa all'anno dall'intera flotta [Km].
vm_i	velocità media operativa del veicolo [Km/h]
Pm_i	Potenza media del veicolo [Kw]
N_i	numero di veicolo componenti la flotta nel sistema di consegna.
M_j	Numero di operatori nel sistema di consegna.
τ	coefficiente di traffico. Il suo valore varia tra 1 (assenza di traffico); 1.2 (livello di traffico basso), 1.6 (livello di traffico elevato) e 2 (livello di traffico molto elevato). Per il sistema di consegna senza equipaggio $\tau = 1$.
en_i	Energia necessaria per soddisfare il fabbisogno annuale di consegna [KWh].

Sono stati introdotti i seguenti parametri di costo

- Costi di ammortamento acquisto veicolo: a_i [€/anno];
- Costi di acquisto software e/o accessori tecnologici: q_i [€/anno];
- Costi fissi ins_i : costi di assicurazione del veicolo
- Bollo e tasse di proprietà del veicolo: f_i ;
- Pedaggi stradali e tasse: t_i ;
- Stipendio operatore: s_i [€/ora]
- Costo unitario del reso: C_{ret} [€/anno];
- Costo amnacata consegna: C_{fd} [€/anno];
- Costo unitario energia: ce_d [€/anno].

Infine, sono introdotte tre variabili binarie al fine di "attivare" diverse tipologie di sistemi logistici dell'ultimo miglio, es. veicoli elettrici, droni , veicoli a guida autonoma. Le definizioni sono riportate come segue:

- $A=1 = 1$ nel caso in cui si adottino furgoni con motore a combustione interna, $A=0$ negli altri casi;
- $B=1$ nel caso in cui nel sistema di consegna siano utilizzati furgoni con motore a combustione interna o veicoli terrestri a guida autonoma, $B=0$ negli altri casi;
- $C=1$ nel caso in cui nel sistema di consegna vengano utilizzati furgoni elettrici o droni o veicoli terrestri a guida autonoma; $C=0$ negli altri casi.

4. APPLICAZIONE DEL MODELLO TRAMITE SIMULAZIONE

Per sviluppare un'analisi di scenario in cui validare la funzione di costo totale presentata nel paragrafo precedente, è stato sviluppato un test case. E' stato analizzato e simulato un sistema di consegna dell'ultimo miglio situato in una città medio-piccola italiana, Lecce.

I dati geografici sono stati esportati dalla piattaforma Open Street Map [33] ed elaborati utilizzando le funzioni dell'API Open Street Map per Python 3.8. Per l'applicazione del modello sono state utilizzate caratteristiche che riqualificano uno specifico modello di UAV [34]. Le caratteristiche principali sono: autonomia di volo di 55 minuti; carico utile massimo 2,5 kg. È stato valutato anche un modello commerciale di veicolo a guida autonoma le cui caratteristiche principali sono:

- Durata della batteria: 2 ore (6 km di guida)
- Velocità massima: 6 km/h
- Velocità media effettiva di servizio: 3 km/h
- Dimensioni spazio di carico: 402 x 344 x 330 mm
- Peso massimo del carico: 10 kg [36].

Il sistema logistico in analisi è composto da un hub locale; le destinazioni di consegna si trovano solo in

un’area urbana vicina all’hub come evidenziato nella Figura 1 nel cerchio rosso.

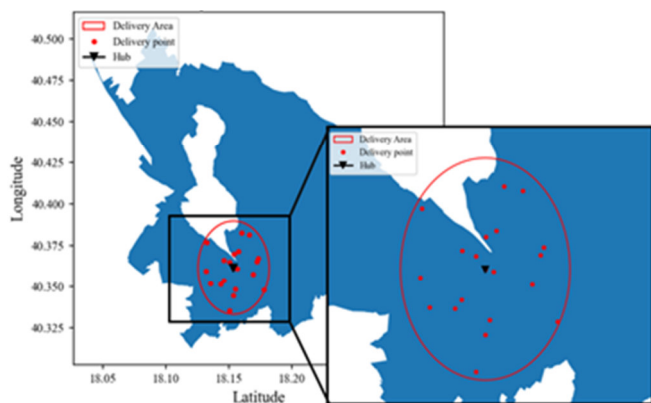


Figura 1. Schematizzazione sistema logistico dell’ultimo miglio considerato

Successivamente, utilizzando la funzione casuale di Python 3.8, è stato estratto un insieme di punti di domanda casuali insieme al numero di pacchi da consegnare su ciascun percorso di consegna. Un esempio è riportato nella Figura 2 sviluppato attraverso un ottimizzatore di percorso online RouteXL.



Figura 2. Percorso definito nel test case

Per le consegne effettuate con drone, sono stati aggiunti gli orari di atterraggio e decollo, sulla base di specifiche informazioni fornite nelle caratteristiche tecniche. Il ciclo totale della consegna con drone comprende un viaggio di ritorno a vuoto per caricare un nuovo prodotto.

4. ANALISI DEI RISULTATI

Applicando le equazioni del modello ai dati del test case sviluppato, è stato possibile confrontare quantitativamente i vari scenari di consegna. Inizialmente sono state valutate configurazioni caratterizzate da una funzione di costo totale a valore minimo valutata in diversi scenari di domanda.

I dati relativi al dimensionamento della flotta in diverse condizioni di domanda sono riportati nella Tabella 2.

Tabella 2. Dimensionamento della flotta in diversi scenari di consegna e di traffico.

N* veicoli/scenario	Domanda prevista [pacchi/turno]			
	20	40	60	80
I=3 (drone)	2	3	3	3
I=4 (veicolo guid autonomo)	9	10	12	13
I=1, I=2 (tradizionali, con alta intensità di traffico)	1	1	2	2
I=1, I=2 (tradizionali, con bassa intensità di traffico)	1	1	1	2

Successivamente, è stata proposta la stima dei KPI per ciascuna configurazione analizzata. I dati sono nelle tabelle 3, 4 e 5.

Tabella 3. Costi unitari di consegna stimati dal modello al variare della domanda, della tipologia di sistema di consegna e di intensità di traffico.

Sistema di consegna	[pacchi/turno]			
	20	40	60	80
Costi unitari stimati [€/pacco]				
Drone	3,08	2,47	2,21	2,10
Veicolo autonomo	5,53	4,07	3,60	3,45
Veicolo tradizionale $\tau = 1$	3,87	2,94	2,47	2,59
Veicolo tradizionale $\tau = 1.6$	4,71	3,62	3,34	3,12
Veicolo tradizionale Van $\tau = 2$	5,26	4,07	3,69	3,47
Veicolo elettrico $\tau = 1$	4,07	3,04	2,54	2,39
Veicolo elettrico $\tau = 1.6$	4,90	3,71	3,47	3,21
Veicolo elettrico $\tau = 2$	5,44	4,15	3,82	3,55

I risultati evidenziano che la consegna tramite drone è l’opzione più economica, anche se il furgone tradizionale è ancora molto competitivo, soprattutto quando il livello di intensità di traffico è basso. All’aumentare dei livelli di traffico, la convenienza del sistema di consegna tradizionale rispetto ai droni ADR diminuisce. In presenza di livelli di traffico molto elevati, l’opzione del sistema di consegna

tradizionale si rivela la più costosa rispetto ad altre. In questa situazione, l'introduzione dei droni (con specifiche limitazioni, ad esempio sul peso da trasportare) potrebbe rappresentare l'opzione più economica.

Tabella 4. Energia stimata su base annuale per ogni consegna al variare della domanda e della tipologia di sistema di consegna.

Sistema di consegna	[pacchi/turno]			
	20	40	60	80
	Energia $\left[\frac{kWh}{\text{anno consegna}} \right]$			
Veicolo tradizionale	95,77	72,81	49,29	56,83
Veicolo elettrico	22,96	17,46	11,82	13,63
Drone	1,48	1,21	1,19	1,28
Veicolo Autonomo	6,70	5,47	5,40	5,81

Tabella 5. Emissioni stimate su base annuale per ogni consegna al variare della domanda e della tipologia di sistema di consegna.

Sistema di consegna	[pacchi/turno]			
	20	40	60	80
	Emissioni $\left[\frac{kg CO_2}{\text{year} \cdot \text{parcel}} \right]$			
Veicolo tradizionale	350,60	266,56	180,46	208,04
Veicolo elettrico	91,17	69,31	46,93	54,10
Drone	5,86	4,79	4,72	5,09
Veicolo Autonomo	26,60	21,72	21,42	23,08

Come si evidenzia dai dati relativi all'energia consumata e le emissioni stimate la consegna con drone risulta essere la più conveniente dal punto di vista ambientale, seguita dal sistema con veicoli autonomi terrestri.

5. CONCLUSIONI

Questo studio mira a confrontare in modo quantitativo le prestazioni economiche e ambientali di diversi tipi di sistemi di consegna nella logistica dell'ultimo miglio. Sono state valutate alternativamente diverse opzioni, da quelle tradizionali a quelle basate sulle tecnologie intelligenti (guida autonoma terrestre e aerea). È stato definito un modello quantitativo di costo totale insieme ad uno per la stima del livello di emissioni e della domanda di energia al fine di valutare in diverse condizioni (domanda e livello di traffico) la configurazione più economica dello specifico sistema di fornitura. È stata definita una serie di KPI sulla base dei livelli di servizio stimati e delle prestazioni ambientali. Questi modelli sono stati validati

attraverso una simulazione di test case. Sono state analizzate diverse condizioni dovute alla domanda e ai livelli di traffico al fine di valutare le prestazioni economiche e ambientali di ciascun sistema di consegna. Anche se i risultati non sono caratterizzati da validità generale, si possono delineare alcuni feedback interessanti. La sostituzione dei tradizionali camion per le consegne con droni o veicoli a guida autonoma migliora significativamente le prestazioni ambientali (basate sulla riduzione delle emissioni e del consumo energetico). I droni sono caratterizzati da livelli di servizio più elevati rispetto ai veicoli autonomi, che risultano poco competitivi anche rispetto ai sistemi di consegna tradizionali. Tuttavia, va notato che l'uso dei droni è ancora caratterizzato da numerose limitazioni a partire dalla definizione di una specifica area di volo fino ai limiti dovuti al carico utile massimo, condizioni meteorologiche che non sono state analizzate nel presente studio.

Per la ricerca futura, l'approccio proposto potrebbe essere migliorato utilizzando dati reali sulle spedizioni di camion tradizionali ottenuti direttamente dai fornitori di servizi logistici, che potrebbero essere utilizzati anche in un ambiente di simulazione adottando una logica di gemello digitale. Inoltre, la valutazione di combinazioni miste di diversi tipi di trasporto potrebbe anche aumentare l'applicabilità del modello quantitativo proposto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Jucha, P., & Corejova, T. (2021). Ensuring the logistics of the last mile from the perspective of distribution companies. *Transportation Research Procedia*, 55, 482–489. doi: 10.1016/j.trpro.2021.07.012
- [2] Pina-Pardo, J. C., Moreno, M., Barros, M., Faria, A., Winkenschach, M., & Janjevic, M. (2022). Design of a two-echelon last-mile delivery model. *EURO Journal on Transp. and Logistics*, 11 (April), 100079. doi: 10.1016/j.ejtl.2022.100079
- [3] <https://www.iea.org/reports/transport>
- [4] doi: 10.48550/arXiv.2009.01960
- [5] Borghetti, F., Caballini, C., Carboni, A., Grossato, G., Maja, R., & Barabino, B. (2022). The Use of Drones for Last-Mile Delivery: A Numerical Case Study in Milan, Italy. *Sustainability (CH)*, 14(3), 1–19. doi: 10.3390/su14031766
- [6] Alfandari, L., Ljubić, I., & De Melo da Silva, M. (2022). A tailored Benders decomposition approach for last-mile delivery with autonomous robots. *European Journal of Operational Research*, 299(2), 510–525. doi: 10.1016/j.ejor.2021.06.048
- [7] Li, L., He, X., Keoleian, G. A., Kim, H. C., De Kleine, R., Wallington, T. J., & Kemp, N. J. (2021). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions for Last-Mile Parcel Delivery by Automated Vehicles and Robots. *Environmental Science and Technology*, 55(16), 11360–11367. doi: 10.1021/acs.est.0c08213
- [8] Ostermeier, M., Heimfarth, A., & Hübner, A. (2022). Cost-optimal truck-and-robot routing for last-mile delivery. *Networks*, 79(3), 364–389. doi: 10.1002/net.22030

- [9] Ranieri, L., Digiesi, S., Silvestri, B., & Roccotelli, M. (2018). A review of last mile logistics innovations in an externalities cost reduction vision. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3), 1–18. doi: 10.3390/su10030782
- [10] Garus, A., Alonso, B., Raposo, M. A., Grosso, M., Krause, J., Mourtzouchou, A., & Ciuffo, B. (2022). Last-mile delivery by automated droids. *Sustainability assessment on a real-world case study. Sustainable Cities and Society*, 79(January), 103728. doi: 10.1016/j.scs.2022.103728
- [11] Aurambout, J. P., Gkoumas, K., & Ciuffo, B. (2019). Last mile delivery by drones: an estimation of viable market potential and access to citizens across European cities. *European Transport Research Review*, 11(1). doi: 10.1186/s12544-019-0368-2
- [12] Lai, P. L., Jang, H., Fang, M., & Peng, K. (2022). Determinants of customer satisfaction with parcel locker services in last-mile logistics. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, 38(1), 25–30. doi: 10.1016/j.ajsl.2021.11.002
- [13] Asdecker, B. (2021). Building the E-commerce Supply Chain of the Future: What Influences Consumer Acceptance of Alternative Places of Delivery on the Last-Mile. *Logistics*, 5(4), 90. doi: 10.3390/logistics5040090
- [14] Lin, Y. H., Wang, Y., He, D., & Lee, L. H. (2020). Last-mile delivery: Optimal locker location under multinomial logit choice model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 142(July), 102059. doi: 10.1016/j.tre.2020.102059
- [15] Rabe, M., Gonzalez-Feliu, J., Chicaiza-Vaca, J., & Tordecilla, R. D. (2021). Simulation-optimization approach for multi-period facility location problems with forecasted and random demands in a last-mile logistics application. *Algorithms*, 14(2). doi: 10.3390/a14020041
- [16] Buzzega, G., & Novellani, S. (2022). Last mile deliveries with lockers: formulations and algorithms. *Soft Computing*. doi: 10.1007/s00500-021-06592-6
- [17] Jiang, L., Chang, H., Zhao, S., Dong, J., & Lu, W. (2019). A Travelling Salesman Problem with Carbon Emission Reduction in the Last Mile Delivery. *IEEE Access*, 7, 61620–61627. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2915634
- [18] Pourrahmani, E., & Jaller, M. (2021). Crowdshipping in last mile deliveries: Operational challenges and research opportunities. *Socio-Economic Planning Sciences*, 78(February), 101063. doi: 10.1016/j.seps.2021.101063
- [19] Dupljanin, D., Mirkovic, M., Dumnic, S., Culibrk, D., Milišavljević, S., & Sarac, D. (2019). Urban crowdsourced last mile delivery: Mode of transport effects on fleet performance. *International Journal of Simulation Modelling*, 18(3), 441–452. doi: 10.2507/IJSIMM18(3)481
- [20] Cao, J., Olvera-Cravioto, M., & Shen, Z. J. (2020). Last-mile shared delivery: A discrete sequential packing approach. *Mathematics of Operations Research*, 45(4), 1488–1497. doi: 10.1287/MOOR.2019.1039
- [21] Gdowska, K., Viana, A., & Pedrosa, J. P. (2018). Stochastic last-mile delivery with crowdshipping. *Transportation Research Procedia*, 30, 90–100. doi: 10.1016/j.trpro.2018.09.011
- [22] Seghezzi, A., & Mangiaracina, R. (2022). Investigating multi-parcel crowdsourcing logistics for B2C E-commerce last-mile deliveries. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 25(3), 260–277. doi: 10.1080/13675567.2021.1882411
- [23] Siragusa, C., Tumino, A., Mangiaracina, R., & Perego, A. (2022). Electric vehicles performing lastmile delivery in B2C E-commerce: An economic and environmental assessment. *International Journal of Sustainable Transportation*, 16(1), 22–33. doi: 10.1080/15568318.2020.1847367
- [24] Caggiani, L., Colovic, A., Prencipe, L. P., & Ottomanelli, M. (2021). A green logistics solution for lastmile deliveries considering e-vans and e-cargo bikes. *Transportation Research Procedia*, 52(2020), 75–82. doi: 10.1016/j.trpro.2021.01.010
- [25] Iwan, S., Nürnberg, M., Jedliński, M., & Kijewska, K. (2021). Efficiency of light electric vehicles in last mile deliveries – Szczecin case study. *Sustainable Cities and Society*, 74(February). doi: 10.1016/j.scs.2021.103167
- [26] Wang, C. N., Nguyen, N. A. T., Dang, T. T., & Hsu, H. P. (2021). Evaluating Sustainable Last-Mile Delivery (LMD) in B2C E-commerce Using Two-Stage Fuzzy MCDM Approach: A Case Study from Vietnam. *IEEE Access*, 9(Lmd), 146050–146067. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3121607
- [27] Verri, F. A. N., Marcondes, C. A. C., Loubach, D. S., Sbruzzi, E. F., Marques, J. C., Pereira, L. A., De Albuquerque Maximo, M. R. O., & Curtis, V. V. (2020). An analysis on tradable permit models for last-mile delivery drones. *IEEE Access*, 8, 186279–186290. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030612
- [28] Ostermeier, M., Heimfarth, A., & Hübner, A. (2022). Cost-optimal truck-and-robot routing for last-mile delivery. *Networks*, 79(3), 364–389. doi: 10.1002/net.22030
- [29] Wang, C., Lan, H., Saldanha-Da-gama, F., & Chen, Y. (2021). On optimizing a multi-mode last-mile parcel delivery system with vans, truck and drone. *Electronics (Switzerland)*, 10(20), 1–18. doi: 10.3390/electronics10202510
- [30] Aurambout, J. P., Gkoumas, K., & Ciuffo, B. (2019). Last mile delivery by drones: an estimation of viable market potential and access to citizens across European cities. *European Transport Research Review*, 11(1). doi: 10.1186/s12544-019-0368-2
- [31] Hoffmann, T., & Prause, G. (2018). On the regulatory framework for last-mile delivery robots. *Machines*, 6(3), 6–8. doi: 10.3390/machines6030033
- [32] Li, L., He, X., Keoleian, G. A., Kim, H. C., De Kleine, R., Wallington, T. J., & Kemp, N. J. (2021). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions for Last-Mile Parcel Delivery by Automated Vehicles and Robots. *Environmental Science and Technology*, 55(16), 11360–11367. doi: 10.1021/acs.est.0c08213
- [33] <https://www.openstreetmap.org/#map=5/42.908/11.602>
- [34] https://chainstoreage.com/walmart-goes-live-drone-delivery-three-states?oly_enc_id=713219757601C4B&utm_source=omeda&utm_medium=email&utm_campaign=NL_CSA+Day+Breaker