



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

Distribuzione urbana delle merci con veicoli elettrici: problematiche e prospettive

G. Fusco, S. Ricci, C. Colombaroni, F. Carrese

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE EDILE E AMBIENTALE



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Report RdS/PTR2019/020

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Mobilità

Linea di attività: Analisi ed approccio modellistico al problema di ottimizzazione dell'e-Last-mile. Algoritmi per la stima dei consumi del TPL urbano su ferro

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *Sviluppo di algoritmi e di un sistema informatico di ottimizzazione della distribuzione urbana delle merci con veicoli elettrici.*"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Maria Pia Valentini

Responsabile scientifico DICEA Sapienza Università di Roma: Prof. Gaetano Fusco

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 DISTRIBUZIONE URBANA DELLE MERCI CON VEICOLI ELETTRICI: PROBLEMATICHE E PROSPETTIVE.....	5
2.2 PROBLEMATICHE E OPPORTUNITÀ TECNOLOGICHE PER L'UTILIZZO DI VEICOLI MERCI ELETTRICI IN CAMPO URBANO.	15
2.3 OTTIMIZZAZIONE DELLA DISTRIBUZIONE URBANA DELLE CONSEGNE DI MERCI: STATO DELL'ARTE.....	19
3 CONCLUSIONI.....	26
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	27
5 APPENDICE	31

Sommario

Il documento tratta le problematiche e le opportunità connesse alla distribuzione delle merci nelle aree urbane con veicoli elettrici. Vengono analizzate le componenti del processo logistico, con particolare riferimento agli aspetti organizzativi del processo distributivo in campo urbano, e vengono presentati i dati relativi alle emissioni inquinanti e di gas serra prodotte nel settore dei trasporti in generale e in quello di magazzino e logistica. Vengono quindi trattate le opportunità connesse al prevedibile progresso tecnologico nella produzione dei veicoli elettrici e dei relativi sistemi di ricarica.

Infine, viene presentata una rassegna della letteratura scientifica del problema di logistica distributiva, consistente nell'organizzazione dei giri di consegna e nell'istadamento della flotta di veicoli. Questo problema, noto come *vehicle routing problem*, è stato oggetto dalla fine degli anni '50 di una vasta letteratura, con una generalizzazione via via crescente della formulazione matematica.

Numerose varianti del problema riguardano la distribuzione delle merci con flotte di veicoli esclusivamente o anche in parte elettrici e introducono i vincoli di autonomia delle batterie, contemplando la possibilità di ricarica completa o parziale durante il percorso o quella di sostituzione delle batterie in stazioni appositamente attrezzate. Alcuni modelli includono la possibilità di ottimizzare la posizione delle stazioni di ricarica nell'area da servire considerando la possibilità di utilizzo di veicoli diversi e stazioni di ricarica con tecnologie differenti nelle aree periferiche e in quelle centrali dell'area urbana.

L'analisi della letteratura scientifica ha consentito di individuare le caratteristiche desiderate per l'algoritmo di ottimizzazione della distribuzione urbana: includere vincoli relativi alle finestre temporali e alla capacità di carico in peso e volume; includere il vincolo di autonomia delle batterie; considerare diverse tecnologie di ricarica, lenta o veloce; includere un modello di consumo energetico per le diverse tipologie di veicoli.

1 Introduzione

Il trasporto delle merci nelle aree urbane rappresenta una componente rilevante della mobilità complessiva; ancor più rilevante è il suo impatto sul livello di congestione, a causa della inefficienza del processo logistico, estremamente parcellizzato, e sull'ambiente, a causa della composizione del parco veicolare.

In vari Paesi europei sono state introdotte e si stanno introducendo ancora, soprattutto con il massiccio sviluppo dell'e-commerce, piattaforme logistiche urbane dove realizzare il consolidamento delle merci, al fine di razionalizzare il processo di distribuzione finale, ottimizzando i percorsi e il numero di veicoli utilizzati. La distribuzione nei Centri storici viene così riservata a veicoli compatibili con l'ambiente urbano. Lo svantaggio di questa strategia sta nel fatto che il consolidamento introduce un'operazione in più nel processo logistico e, oltre a richiedere spazi e personale, rischia di accrescere i costi del processo e dilatarne i tempi, disattendendo le crescenti esigenze di rapidità nell'approvvigionamento da parte del sistema della distribuzione. Perché la distribuzione delle merci avvenga in maniera compatibile sia con l'ambiente che con le attività economiche, è necessario sviluppare strategie gestionali e sistemi informativi dinamici in grado di utilizzare le tecniche di telecomunicazione e di calcolo per realizzare un servizio di distribuzione flessibile e gestibile in tempo reale.

Nell'Accordo di collaborazione con l'ENEA, l'Unità di Ricerca del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA) della Sapienza ha come obiettivo la realizzazione di un software che si colloca fra gli strumenti di *Information and Communication Technology* (ICT) per la pianificazione ed ottimizzazione *day-to-day* della distribuzione urbana delle merci, oggetto tipico dei sistemi di Supply Chain Planning.

Nella formulazione del problema e nella progettazione del software, si assume che la distribuzione avvenga con veicoli elettrici dotati di monitoraggio del livello di carica della batteria e utilizzi piazzole di carico/scarico con prenotazione.

Nel primo anno di progetto, il problema viene preliminarmente affrontato in termini metodologici, analizzandone i requisiti funzionali, le caratteristiche operative e gli algoritmi risolutivi.

Le attività del primo anno sono articolate in tre tematiche, trattate in altrettanti rapporti tecnici:

1. Distribuzione urbana delle merci con veicoli elettrici: problematiche e prospettive
2. Studio e sviluppo di algoritmi per l'ottimizzazione della distribuzione urbana delle merci con veicoli elettrici
3. Sviluppo di un modello di calcolo dei consumi elettrici del trasporto ferroviario.

Il presente Rapporto tecnico "Distribuzione urbana delle merci con veicoli elettrici: problematiche e prospettive" riporta i risultati dell'analisi metodologica delle criticità del sistema della logistica urbana, dei requisiti per una gestione efficiente con veicoli elettrici e fornisce un quadro dello stato dell'arte degli approcci metodologici all'ottimizzazione del processo.

Le attività svolte vengono descritte nella sezione seguente, articolata nei seguenti capitoli:

- Analisi delle problematiche organizzative, tecnologiche e procedurali della distribuzione urbana delle merci con veicoli elettrici.
- Problematiche e opportunità tecnologiche per l'utilizzo di veicoli merci elettrici in campo urbano.
- Ottimizzazione della distribuzione urbana delle consegne di merci: Stato dell'arte.

Le conclusioni riassumono i risultati delle attività di ricerca e ne specificano il contributo utile per le fasi successive della ricerca.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Distribuzione urbana delle merci con veicoli elettrici: problematiche e prospettive

Il trasporto delle merci svolge un ruolo essenziale nell'economia, in quanto influenza la competitività tanto dei settori produttivi quanto di quelli commerciali e costituisce esso stesso un'attività economica rilevante per occupazione e reddito. La logistica distributiva urbana, in particolare, assume una sempre crescente rilevanza, per un insieme di fattori: l'incremento delle superfici di territorio urbanizzate, la diffusione dell'e-commerce con la conseguente moltiplicazione delle consegne e, infine, la crescente sensibilità ambientale. Contestualmente al crescente impatto sociale ed ambientale della logistica urbana, crescono i requisiti di mercato, con la diffusione delle consegne espresse (*just-in-time*) per la maggior parte delle categorie merceologiche; cresce pertanto anche la rilevanza della logistica urbana come settore economico. Affrontare

con approccio sistemico e in maniera strutturale la logistica urbana consente altresì di incidere positivamente sulla qualità della vita, permettendo di contenere le emissioni in atmosfera e di ridurre la congestione stradale. Nonostante ciò, il trasporto e la distribuzione urbana delle merci sono tuttora un fenomeno poco organizzato e pianificato, non solo in Italia.

Il trasporto delle merci è peraltro un fenomeno caratterizzato da un'elevata complessità, in cui diversi operatori (produttori, spedizionieri, trasportatori, distributori, rivenditori all'ingrosso e al dettaglio, consumatori finali) intervengono, ciascuno con un proprio ruolo, nel processo di distribuzione delle merci (formazione/trasformazione del carico, trasporto, magazzinaggio, distribuzione finale), affrontando problemi di natura spesso completamente differente a seconda della tipologia di merce trasportata.

In campo urbano questa complessità si sovrappone ad una realtà altrettanto articolata e varia, in cui soggetti diversi (residenti, operatori commerciali, produttori, utenti del sistema di trasporto pubblico e del sistema stradale) si confrontano con esigenze e problematiche diverse e spesso contrastanti.

Negli ultimi anni si è avuto un crescente interesse sia dei decisori che del mondo della ricerca verso i problemi legati alla logistica ed al trasporto delle merci in area urbana e metropolitana, per la crescente consapevolezza che una migliore organizzazione della logistica comporta implicazioni positive non solo sull'economia, ma anche sulla qualità della vita dei cittadini, in termini di riduzione dei fenomeni di congestione e dei livelli di inquinamento da traffico veicolare.

Componenti della logistica distributiva urbana

I requisiti della logistica distributiva urbana sono fortemente differenziati in base ai settori di mercato delle merci trasportate, che differiscono per peso, volume, valore, deperibilità, componibilità, tracciabilità, tempestività delle consegne. Sono pertanto egualmente differenziate le problematiche e vari i requisiti che caratterizzano le diverse tipologie di mercato e categorie merceologiche. Ai fini della ottimizzazione della logistica distributiva urbana diventa allora utile introdurre una classificazione dei diversi settori di mercato cui far corrispondere differenti modalità di gestione della catena logistica. In letteratura, la classificazione più diffusa distingue i seguenti settori di mercato della logistica distributiva urbana.

- **Retail Market:** contiene catene di vendita, vendita indipendente ed *e-commerce*. Le catene di vendita al dettaglio distribuiscono merci ai negozi affiliati utilizzando propri veicoli commerciali (di effettiva proprietà o con affidamento a terzi) a media o alta capacità per aumentare l'efficienza di consegna. I rivenditori indipendenti, d'altra parte, sono comunemente esercizi commerciali di piccole o medie dimensioni a cui diversi fornitori forniscono merci con frequenze differenti a seconda delle categorie merceologiche: anche più volte al giorno per gli alimentari e molto meno frequenti per abbigliamento o arredamento. Un mercato di crescente rilevanza è l'*e-commerce*, tipicamente focalizzato sulla consegna a domicilio per il trasporto di beni acquistati *online* ai destinatari (case, uffici, o punti di ritiro) utilizzando corrieri. Questi servizi utilizzano, in genere, veicoli commerciali leggeri verso e all'interno delle aree residenziali con numerose intermedie fermate lungo il percorso.
- **Express/Posta:** è costituito da operatori postali, corrieri ed express market. Gli operatori postali nazionali dirigono principalmente il mercato delle lettere e dei pacchi in reti *hub-and-spoke*; in maniera simile avvengono le consegne a domicilio nell'*e-commerce*, che consegnano beni eterogenei a diversi destinatari con molte fermate.
- **HoReCa:** l'acronimo sta per Hotel-Restaurant-Catering: comprende sia catene di HoReCa che HoReCa indipendenti. Le caratteristiche tipiche di questo mercato sono le forniture *just-in-time* e le richieste, in piccole quantità, e molto frequenti, di merce fresca. In particolare, le consegne frequenti sono specifiche del mercato indipendente HoReCa, poiché le catene HoReCa (come grandi catene alberghiere e di ristoranti) possono realizzare economie di scala tramite consegne più consolidate e meno frequenti.
- **Edilizia:** il mercato delle costruzioni è un'industria frammentata, che offre una vasta gamma di materiale da costruzione per cantieri infrastrutturali e costruzioni residenziali. Nonostante le attività di costruzione siano programmate in base alla progettazione, la frammentazione dell'industria e la variabilità delle attività di costruzione possono generare numerosi viaggi a vuoto o con un basso tasso di occupazione.
- **Raccolta dei rifiuti:** il settore comprende rifiuti urbani, rifiuti di produzione/industriali, rifiuti pericolosi e rifiuti edili. La raccolta dei rifiuti comprende ovviamente un'ampia varietà di materiali, come ad esempio

carta, cibo, vetro, plastica, metallo, medicinali, colori, batterie e materiale da costruzione. Le modalità di trasporto dipendono dai diversi tipi di rifiuto. Ad esempio, la raccolta dei rifiuti solidi avviene con frequenza programmata, variabile con la tipologia di rifiuto, con molti punti di raccolta e quindi molte fermate intermedie, mentre nella raccolta di prodotti industriali i rifiuti vengono effettuati con una frequenza differente e con un minor numero di fermate intermedie rispetto alla raccolta dei rifiuti domestici.

La struttura della distribuzione urbana delle merci

La struttura della distribuzione urbana delle merci può essere schematizzata considerando che la merce che arriva al consumatore finale può seguire differenti percorsi e canali distributivi; considerando per quanto riguarda la logistica distributiva urbana il processo a valle del produttore, trascurando cioè il processo logistico dalle materie prime alla produzione, si possono individuare i seguenti elementi del processo, le cui interazioni sono evidenziate in Figura 1:

- i **centri di distribuzione**, dove vengono svolte principalmente attività di deposito (magazzinaggio e stoccaggio) e di smistamento delle merci, con la ricezione di grossi lotti dai produttori e la formazione di piccole partite per il rifornimento dei punti vendita;
- i **grossisti**, che acquistano grosse partite dai produttori e le rivendono in piccoli lotti ai dettaglianti ad un prezzo maggiorato dei costi di gestione e del margine di profitto.

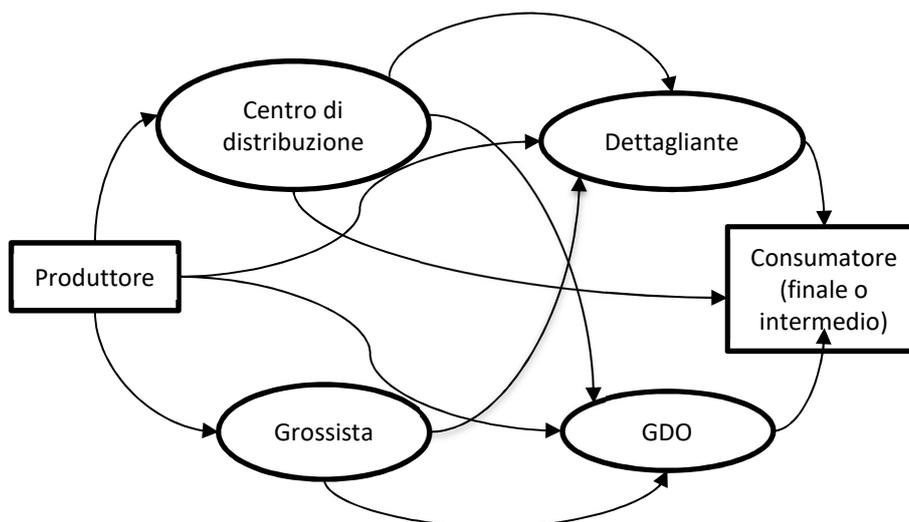


Figura 1. Schema semplificato del processo di logistica distributiva urbana.

A valle dei centri di distribuzione e dei grossisti si collocano le **attività di vendita**. Queste, a loro volta, possono essere divise in Grande Distribuzione Organizzata (**GDO**) e Piccola Distribuzione (**dettaglianti**).

Il trasporto della merce dal mittente (ad esempio, produttore o grossista) al destinatario (ad esempio, dettagliante) può essere svolto in conto proprio o in conto terzi.

Il **trasporto in conto proprio** può essere eseguito direttamente dal mittente o dal destinatario con mezzi propri.

Il **trasporto in conto terzi** è, invece, eseguito da un vettore di professione che lo effettua a fronte di una remunerazione pattuita. In particolare, il trasporto in conto terzi può avvenire utilizzando un'azienda di trasporto tradizionale per quantitativi di merce elevati o corrieri espressi per quantitativi di merce ridotti e con alta frequenza. Pertanto, il rifornimento delle attività commerciali può avvenire per conto del:

- mittente della merce (ad es., grossista), che utilizza:
 - mezzi propri (conto proprio),
 - servizi di trasporto offerti da terzi (conto terzi trasportatore o conto terzi corriere espresso);
- destinatario della merce (ad es., dettagliante), che utilizza:
 - mezzi propri (conto proprio, per auto-approvvigionamento),
 - servizi di trasporto offerti da terzi (conto terzi trasportatore o conto terzi corriere espresso).

Possibili schemi di distribuzione delle merci

Gli elementi che compongono la catena logistica sono le attività di produzione (modificazione della forma), di trasporto (modificazione nello spazio), stoccaggio (modificazione nel tempo), composizione e consumo [1]. Queste attività interdipendenti avvengono ripetutamente all'interno di una catena logistica.

Nella distribuzione finale, tralasciando l'ultimo anello rappresentato dai consumatori, la catena logistica è tipicamente organizzata secondo uno dei due schemi di distribuzione diretta riportati nella Figura 2.

In questo caso, i centri di distribuzione sono localizzati in una qualunque posizione intermedia tra origine e destinazione degli spostamenti.

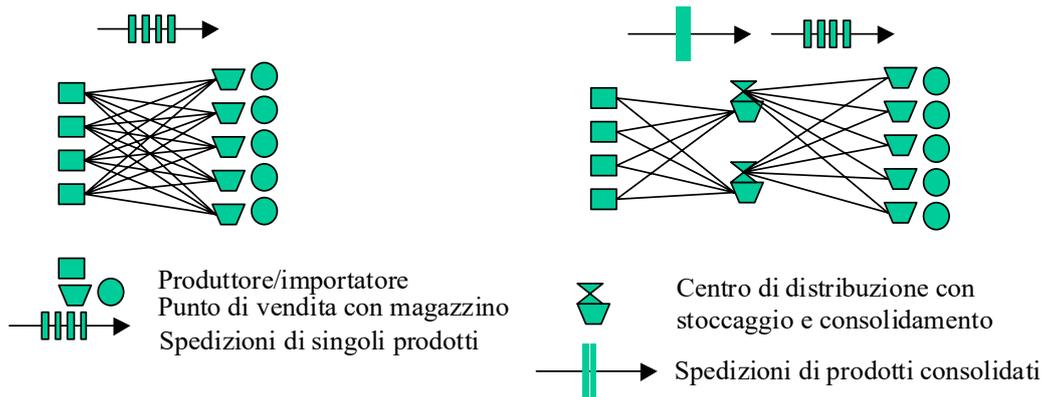


Figura 2. Schema tradizionale di logistica della distribuzione di merci.

Gli attuali sviluppi nel settore della logistica stanno producendo una profonda trasformazione di questo schema:

- la tendenza delle aziende produttrici ad eliminare le attività che non producono valore aggiunto (lo stoccaggio);
- la tendenza a centralizzare produzione e depositi, sviluppi che sono stati innescati dalla globalizzazione, dal relativamente basso costo del trasporto e dalla competizione tra operatori di mercato;
- la presenza di sistemi avanzati di gestione del magazzino e dell'offerta che possono infine essere direttamente condotti dai rivenditori finali.

L'applicazione dei più recenti criteri di logistica integrata dovrebbe portare alla progettazione di catene logistiche organizzate secondo schemi diversi in cui è accresciuta la quota di trasporto consolidato ed è fatto uso sia di centri di distribuzione prossimi alle aree di produzione (riduzione dei costi logistici) sia di centri di distribuzione prossimi ai mercati (miglioramento del livello del servizio).

Inoltre, viene operata una chiara distinzione tra movimentazioni veloci ("specialities", prodotti ad alto margine netto, per l'acquisizione dei quali è richiesta un'elevata qualità e rapidità di servizio) e movimentazioni lente ("commodities", prodotti a basso margine netto).

Questi flussi possono essere teoricamente spediti lungo percorsi differenti: le movimentazioni veloci in prossimità delle aree urbane, le movimentazioni lente in prossimità dei luoghi di produzione (Figura 3).

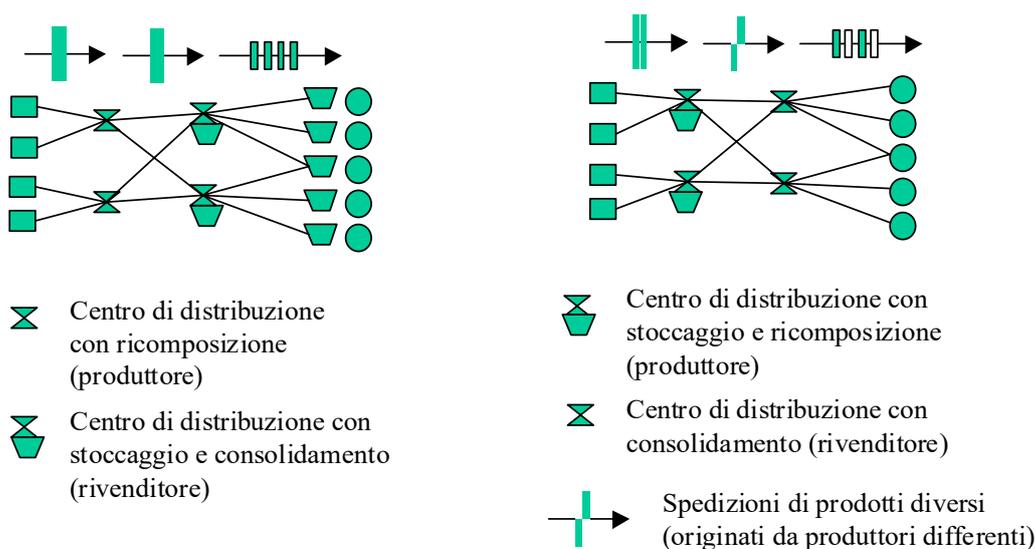


Figura 3. Schema logistico per la movimentazione veloce (a sinistra) e lenta (a destra).

L'attuazione di questi schemi comporta la razionalizzazione di attività di concentrazione, selezione e smistamento dei prodotti destinati alla vendita:

- il concentrazione (o composizione) si riferisce alla raccolta delle merci, generalmente in lotti di grandi dimensioni, provenienti da fonti di approvvigionamento;
- il selezionamento (o *picking*) riguarda la preparazione dell'insieme di prodotti, nella gamma e nella quantità richiesta, destinati ai diversi nodi, collocati a valle, nella rete distributiva;
- lo smistamento consiste nel far arrivare i prodotti nell'assortimento richiesto, nel luogo di destinazione e nel tempo assegnato.

L'insieme di queste attività comporta un incremento del valore aggiunto dei prodotti e giustifica di conseguenza l'esistenza di intermediari (ad esempio grossisti) nel canale distributivo che collega l'azienda produttrice al consumatore finale. La razionalizzazione della catena logistica presuppone che le funzioni svolte dai diversi intermediari presentino le minime sovrapposizioni e duplicazioni.

Problematiche ambientali della logistica urbana

La logistica urbana deve affrontare le sfide connesse con la crescita dell'urbanizzazione e la rapida diffusione del commercio elettronico che, entrambe, comportano un aumento dei volumi e della frequenza delle spedizioni nei territori dove si concentra la popolazione e che sono quindi più sensibili. Nell'Unione europea, il 75% di tutti gli abitanti vive nelle aree urbane ed è previsto che questo numero aumenterà dello 0,5% ogni anno. Il trasporto totale su strada (passeggeri e merci) provoca il 72,9% di tutte le emissioni di gas a effetto serra (GHG) correlate ai trasporti [2]. Inoltre, il trasporto di merci su strada nel centro delle città storiche dell'UE, che non dispone di spazio sufficiente per tutti i tipi di veicoli, aggrava il problema con la congestione. Il trasporto è considerato uno dei fattori più importanti per il raggiungimento dell'obiettivo dell'accordo di Parigi nell'ambito delle Nazioni Unite [3], i cui obiettivi sono:

- mantenere l'aumento della temperatura media globale entro i 2°C al di sopra dei livelli preindustriali e proseguire gli sforzi per limitare l'aumento della temperatura a 1,5°C al di sopra dei livelli preindustriali, riconoscendo che ciò ridurrebbe significativamente i rischi e gli impatti dei cambiamenti climatici;
- aumentare la capacità di adattamento agli impatti negativi dei cambiamenti climatici e favorire la resilienza climatica e lo sviluppo di basse emissioni di gas a effetto serra, in modo da non minacciare la produzione alimentare;
- Rendere i flussi finanziari coerenti con un percorso verso basse emissioni di gas a effetto serra e sviluppo resiliente al clima.

Secondo le più recenti statistiche di Eurostat, nel 2018 i trasporti hanno contribuito per circa il 15% alle emissioni globali di GHG e sono stati responsabili di circa il 30% del consumo di energia, del 36% delle emissioni di ossidi zolfo, del 47% di quelle degli ossidi di azoto e del 33% del particolato inferiore a 2,5 micron .

Limitando l'analisi alle attività direttamente legate alla logistica, ed escludendo quelle svolte dalle aziende di trasporto stradale, le attività di magazzino e di supporto al trasporto hanno contribuito per lo 0,8% alle emissioni di GHG, in maniera trascurabile a quelle di ossidi zolfo, all'1% a quelle di ossidi di azoto e allo 0,8% a quelle di particolato. Le attività postali e dei corrieri hanno contribuito per lo 0,1% alle emissioni di GHG e di particolato e allo 0,2% di quelle di ossidi di azoto.

In termini relativi al totale delle emissioni, il contributo delle attività relative alla logistica è contenuto nell'ordine dell'1%. In valori assoluti, tuttavia, le emissioni dovute al settore della logistica non sono trascurabili e, in Europa, assommano a circa 6.500 tonnellate di particolato, di cui 140 in Italia; a 23 milioni di tonnellate di GHG, di cui 2,3 in Italia; a circa 3100 tonnellate di ossidi zolfo, di cui circa 20 in Italia; a circa 100.000 tonnellate di ossidi di azoto, di cui circa 3.800 in Italia.

La Figura 4 illustra l'andamento delle emissioni nocive prodotte in Italia dai settori economici legati alla logistica (attività di magazzino e dei corrieri ed attività postali e dei corrieri) nel periodo 2009-2018. Le emissioni di gas serra sono quasi costanti nel periodo in esame, mentre le emissioni di particolato e di ossidi di azoto e di zolfo hanno evidenziato dal 2009 al 2017 (ultimo anno in cui è disponibile il dato) riduzioni significative, rispettivamente pari al 52% il particolato, al 39% gli ossidi di zolfo e al 28% gli ossidi di azoto.



Figura 4. Emissioni di gas serra (GHG) e di inquinanti (PM2.5, NOx, SOx) in Italia da parte dei settori economici di attività di magazzini e supporto al trasporto e attività postali e di corrieri (elaborazione da dati Eurostat, 2019).

Le riduzioni di emissioni delle sostanze inquinanti sono analoghe a quelle riscontrate, nello stesso periodo, per il settore del trasporto su strada nel suo complesso (escluso il trasporto da parte delle famiglie), che ha ridotto le emissioni di particolato del 53%, degli ossidi zolfo del 35% e degli ossidi di azoto del 36%. Fanno

eccezione le emissioni di gas serra, che per il settore del trasporto su strada sono state del 18%, mentre per il settore della logistica sono diminuite solo del 3%. Sulle emissioni nel settore logistico incide evidentemente in misura rilevante la componente relativa alle attività di magazzino, diminuita del 4%, mentre, limitando l'analisi alle attività postali e dei corrieri, si rileva una riduzione del 24%.

Politiche di gestione e controllo del trasporto merci urbano

Il sistema di consegna delle merci è costituito da una costellazione di attori con interessi diversi, spesso contrastanti. La definizione e l'accettazione di politiche per la gestione e il controllo del trasporto merci in campo urbano può essere migliorata attraverso la consultazione delle parti interessate (usualmente ormai indicate come stakeholder). In generale, il coinvolgimento delle parti interessate viene riconosciuto sempre più come una parte importante di qualsiasi processo decisionale. L'esperienza dimostra che le amministrazioni cittadine ottengono risultati incoraggianti ogni volta che stabiliscono una rete di relazioni costruttive con rivenditori e corrieri al fine di progettare meglio i nuovi schemi di trasporto e concordare le norme da attuare. Consultazioni partecipative di successo tra le parti interessate possono portare all'attuazione di strategie di trasporto ad alto impatto che tengano conto delle esigenze logistiche della città, delle imprese, degli operatori dei trasporti e dei residenti. Data la complessità dell'approccio partecipativo, il coinvolgimento dei diversi attori dovrebbe essere stimolato e massimizzato fin dall'inizio della fase di pianificazione. Sono disponibili diversi modi per svolgere il compito di coinvolgere le parti interessate e sono stati raggruppati in tre argomenti principali: partenariati per la qualità del trasporto, consigli e forum di consulenza sul trasporto merci e designazione di un responsabile della logistica della città [4].

Per affrontare i principali problemi del trasporto merci urbano, molte misure di politiche dei trasporti sono state adottate e testate nelle aree urbane in varie parti del mondo [3].

In questo paragrafo sono presentate diverse categorie di politiche e misure di gestione del trasporto urbano delle merci, adottando la classificazione proposta da Stathopoulos et al. [5], utilizzata anche dalla Commissione europea nell'ambito dell'iniziativa CIVITAS, che riconduce le politiche di mitigazione dei problemi di trasporto in sei grandi classi: misure basate sul mercato; misure di regolazione; pianificazione dell'uso del suolo; misure infrastrutturali; nuove tecnologie; misure di gestione.

Le misure basate sul mercato intendono agire sui costi di consegna, con l'obiettivo di utilizzare il meccanismo dei prezzi per indurre gli operatori e i loro clienti a modificare i loro comportamenti di trasporto. È stato dimostrato che le variazioni dei prezzi hanno un effetto diretto sul comportamento degli operatori del settore merci in quanto il settore è altamente competitivo. Queste strategie possono fare leva sui tre componenti del sistema di trasporto urbano: veicolo, carburante e traffico. Le leve economiche sono: tariffazione (tariffazione stradale, tariffazione della congestione e tariffe di parcheggio), fiscalità, permessi negoziabili e crediti per la mobilità, sussidi e incentivi. Più in dettaglio, le misure basate sul mercato mirano a modificare i prezzi di mercato dei beni la cui produzione o consumo generano costi esterni negativi [6]. La tariffazione della congestione rappresenta una misura economicamente interessante che può essere differenziata per far fronte alle esternalità del trasporto merci [7]. Le misure di prezzo in un contesto del mercato di trasporto merci richiedono tuttavia il dovuto riconoscimento dei ruoli complementari e talvolta contrastanti dei vettori e dei destinatari [8].

Le misure normative (dette anche "misure di comando e controllo") sono regole e divieti progettati per controllare le attività degli operatori del trasporto merci privati al fine di preservare la vivibilità dell'ambiente urbano e garantire un livello adeguato di mobilità. Di solito sono più facili da attuare da parte delle autorità cittadine e possono anche avere un più alto grado di accettabilità tra tutte le parti interessate rispetto ad altri tipi di misure. Ciò è dovuto, principalmente, alla loro natura più tradizionale e all'apparente equità. Questo tipo di misure deve essere supportato da un sistema di controllo / applicazione al fine di prevenire possibili infrazioni. Esempi di questo tipo di misure possono essere raggruppati nei seguenti sottoinsiemi: restrizioni degli orari di accesso, regolamenti sui parcheggi, restrizioni in base alle condizioni ambientali, restrizioni dell'accesso in base alle dimensioni o al carico, gestione dei flussi di traffico merci. Le finestre temporali e le restrizioni di accesso sono le misure più frequentemente utilizzate che possono essere differenziate in base al fattore di carico o all'organizzazione del servizio di trasporto (ad esempio, per conto proprio o di terzi)[9]. I risultati delle politiche di regolazione adottate in varie città europee suggeriscono che

una regolamentazione ambientale mirata alla riduzione degli ingressi dei vettori è tra i modi più efficienti per ridurre le emissioni [10].

Le misure di pianificazione dell'uso del suolo modificano l'uso privato dello spazio urbano a vantaggio del bene pubblico, sebbene ciò possa essere realizzato solo con una politica mantenuta coerente per un lungo periodo a causa del tempo necessario per modificare i modelli esistenti di uso del suolo. Esempi efficaci di politiche urbanistiche rivolte all'efficienza della logistica urbana sono l'inclusione nei piani regolatori di previsioni di spazi specifici per le attività di logistica, dagli standard per le aree di carico e scarico su strada o fuori dalla strada per i veicoli merci, alla localizzazione di centri merci ("city center") dedicati all'integrazione modale. La suddivisione della città in zone di attività economiche e zone non economiche è una misura di uso del suolo che ha un grande impatto sulla logistica urbana: infatti, la concentrazione di attività commerciali facilita la consegna da lunga distanza e la distribuzione delle merci, a beneficio sia degli operatori che dei residenti [6]. In termini più generali, si va sempre affermando un approccio consistente nell'analisi dei sistemi logistici come entità complesse e spazialmente connesse [11], interagenti con il trasporto delle persone a causa della condivisione della rete stradale [12].

Le misure infrastrutturali, spesso integrate nelle misure di pianificazione dell'uso del suolo, sono la categoria di misure di maggiore impatto attuate dalle autorità pubbliche. A causa dell'elevato costo delle misure di pianificazione, attuazione e manutenzione delle infrastrutture di trasporto nelle aree urbane e della loro percezione come "bene pubblico", le autorità cittadine sono spesso gli unici attori disposti e in grado di finanziare la loro attuazione. Inoltre, il raggiungimento del punto di pareggio economico può richiedere molto tempo (in particolare, per raggiungere una massa critica di movimentazione di merci). Una politica comune di razionalizzazione del flusso merci è rappresentata dalle piattaforme logistiche volte a consolidare consegne e ritiri.

Il ruolo delle nuove tecnologie nell'ottimizzazione della logistica urbana può essere molto vario. I servizi di trasporto intelligenti (ITS) possono essere sfruttati per consentire ai conducenti di veicoli merci di optare per percorsi alternativi in risposta alle informazioni ricevute sulle condizioni della rete stradale. Inoltre, è possibile applicare e testare nuove tecnologie per promuovere lo sviluppo e la diffusione di veicoli a bassa emissione per le consegne dell'ultimo miglio. Attualmente esiste una chiara distinzione tra gestione del traffico stradale e gestione del trasporto delle merci. Tuttavia, potrebbero esserci vantaggi reciproci nella cooperazione poiché la gestione del traffico stradale può realizzare sull'infrastruttura di trasporto condizioni ottimizzabili anche per i veicoli merci; d'altra parte, l'applicazione delle tecnologie specifiche per i veicoli merci può garantire un ambiente più sicuro ed efficiente. Alcuni esempi di nuove tecnologie sono: il vehicle routing dinamico, i sistemi di informazione real-time e il controllo dinamico del traffico.

L'ultima categoria, consistente nel coinvolgimento dei portatori d'interesse (stakeholder), riguarda i **metodi di gestione**, implementati da agenti pubblici e privati, volti a promuovere la cooperazione tra operatori.

Politiche europee per la logistica urbana

Secondo il più recente Libro bianco europeo sui trasporti "Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti - Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile" [13], per raggiungere un'economia sostenibile e basse emissioni di carbonio entro il 2050, l'Europa deve ridurre le emissioni dei trasporti di almeno il 60% rispetto al 1990. La politica europea dei trasporti mira a favorire la decarbonizzazione dei trasporti attraverso la graduale attuazione di varie misure da raggiungere entro il 2050, i cui parametri comparativi sono riportati nella Tabella 1. Nella tabella sono riportate anche misure che non riguardano il trasporto delle merci nelle aree urbane, in quanto si ritiene che gli indirizzi e gli obiettivi delle politiche europee vadano analizzati nella loro totalità e non considerati esclusivamente con riferimento alle questioni relative alla distribuzione urbana delle merci.

Dato che un quarto delle emissioni dei trasporti nell'UE ha origine nelle aree urbane, le città svolgono un ruolo chiave nel mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici.

Tabella 1. Obiettivi per un sistema dei trasporti competitivo ed efficiente sul piano delle risorse: parametri comparativi per conseguire l'obiettivo di ridurre del 60% le emissioni di gas serra [13]

Sviluppo e distribuzione di carburanti e sistemi di propulsione nuovi e sostenibili	Ottimizzare le prestazioni delle catene logistiche multimodali, anche facendo maggiore uso di modalità più efficienti dal punto di vista energetico	Aumentare l'efficienza dei trasporti e dell'uso delle infrastrutture con i sistemi di informazione e gli incentivi basati sul mercato
<ul style="list-style-type: none"> • Dimezzare l'uso di automobili "a carburante convenzionale" nel trasporto urbano entro il 2030; eliminarli gradualmente in città entro il 2050; raggiungere una logistica urbana essenzialmente priva di CO2 nei principali centri urbani entro il 2030. • Introdurre combustibili sostenibili a basse emissioni di carbonio nell'aviazione per raggiungere il 40% entro il 2050; inoltre, entro il 2050 ridurre le emissioni di CO2 dell'UE da carburanti per bunker marittimi del 40% (se possibile 50%). 	<ul style="list-style-type: none"> • Trasferire il 30% del trasporto merci su strada con percorrenze superiori 300 km ad altri modi, come il trasporto ferroviario o marittimo, entro il 2030 e oltre il 50% entro il 2050, realizzando corridoi merci efficienti e verdi. Raggiungere questo obiettivo richiederà anche lo sviluppo di infrastrutture adeguate. • Completare una rete ferroviaria europea ad alta velocità entro il 2050, triplicare la lunghezza della rete ferroviaria ad alta velocità esistente entro il 2030 e mantenere una fitta rete ferroviaria in tutti gli Stati membri: entro il 2050 la maggior parte del trasporto di passeggeri a media distanza dovrebbe essere effettuata su ferrovia. • Realizzare una "rete centrale" TEN-T multimodale pienamente funzionante a livello dell'UE entro il 2030, con una rete di alta qualità e capacità entro il 2050 e un corrispondente set di servizi di informazione. • Collegare tutti gli aeroporti della rete centrale alla rete ferroviaria, preferibilmente ad alta velocità, entro il 2050; assicurare che tutti i porti marittimi centrali siano sufficientemente collegati al trasporto ferroviario di merci e, ove possibile, al sistema di navigazione interna. 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementare l'infrastruttura di gestione del traffico aereo (SESAR) modernizzata in Europa entro il 2020 e completamento dello spazio aereo comune europeo. Implementare sistemi equivalenti di gestione dei trasporti terrestri e marittimi (ERTMS), (ITS), (SSN e LRIT), (RIS). Implementare il sistema satellitare europeo di navigazione globale (Galileo). • Entro il 2020, stabilire il quadro per un sistema europeo multimodale di informazione, gestione e pagamento dei trasporti. • Entro il 2050, avvicinarsi a zero vittime nel trasporto su strada. In linea con questo obiettivo, l'UE mira a dimezzare le vittime della strada entro il 2020. Assicurarsi che l'UE sia un leader mondiale nella sicurezza e protezione dei trasporti in tutti i modi di trasporto. • Passare alla piena applicazione dei principi "pagamento per l'uso" e di "pagamento per l'inquinamento" e l'impegno del settore privato per eliminare le distorsioni, compresi i sussidi dannosi, generare entrate e garantire finanziamenti per futuri investimenti nel trasporto.

Tra le linee d'indirizzo, in merito al trasporto delle merci in campo urbano, il Libro bianco afferma che è necessario organizzare in modo più efficiente l'interfaccia tra il trasporto merci di lunga distanza e quello relativo all'ultimo miglio, con l'obiettivo di limitare le consegne individuali – la parte più "inefficiente" del viaggio – a percorrenze il più breve possibili.

L'uso dei sistemi di trasporto intelligenti contribuisce a una gestione del traffico in tempo reale, riducendo i tempi di consegna e la congestione dell'ultimo miglio. In questo ambito potrebbero essere utilizzati autocarri urbani a basse emissioni. L'uso di tecnologie che utilizzano elettricità o idrogeno e di tecnologie ibride permetterà di ridurre, oltre a quello atmosferico, anche l'inquinamento acustico, consentendo così di effettuare nelle ore notturne una buona parte del trasporto delle merci nelle aree urbane e limitare il problema della congestione stradale nelle ore di punta del mattino e del pomeriggio.

Il Libro bianco introduce infine una strategia per conseguire una “logistica urbana a zero emissioni” nel 2030, che si articola nelle seguenti iniziative:

- Produrre orientamenti sulle migliori pratiche per monitorare e gestire meglio i flussi delle merci a livello urbano (ad esempio, centri di consolidamento, dimensioni dei veicoli nei centri storici, limitazioni regolamentari, “finestre” per le consegne, potenzialità non valorizzate del trasporto fluviale).
- Definire una strategia per conseguire l’obiettivo di una “logistica urbana a zero emissioni”, prendendo in esame congiuntamente gli aspetti della pianificazione territoriale, dell’accesso al trasporto ferroviario e fluviale, delle pratiche commerciali e dell’informazione, dei sistemi di tariffazione e delle norme tecnologiche dei veicoli.
- Promuovere appalti pubblici congiunti per i veicoli a basse emissioni nel parco veicoli commerciali (furgoni per le consegne, taxi, autobus...).

Ulteriori categorizzazioni delle politiche di regolamentazione della logistica urbana sono state introdotte nell’ambito di progetti di ricerca. Tra questi, si cita il progetto europeo BESTUFS (2007) [14], che individua tre principali aree d’intervento.

- Approcci relativi alla gestione dell’accesso e del caricamento dei veicoli merci nelle aree urbane, comprendenti un uso efficiente delle infrastrutture, una guida sulle misure per l’accesso e il caricamento dei veicoli merci nelle aree urbane e tecnologia nel trasporto merci urbano;
- Problematiche relative alle soluzioni dell’ultimo miglio comprendenti il commercio elettronico;
- Principali interventi associati ai centri di consolidamento urbano e alla successiva distribuzione delle merci.

Le misure di regolamentazione possono incidere sulle seguenti variabili:

- Finestre temporali: periodi specifici per la consegna o il transito in aree congestionate;
- Uso delle corsie e dello spazio stradale: permesso di utilizzare arterie specifiche (corsie di autobus) e spazi riservati per operazioni di carico, scarico o consegna;
- Norme ambientali: limiti delle caratteristiche o dell’impatto del veicolo merci, ad esempio consumo di carburante, potenza del motore, emissioni, ecc.
- Limitazioni di peso, volume, o del fattore di carico: limitare l’accesso a determinate zone in base al rispetto dei limiti di peso, volume o fattore di carico;
- Diritti di accesso: strumento utilizzato in generale per contrastare la congestione del traffico (ad esempio mediante la *congestion charge*) e per contribuire a migliorare la mobilità urbana complessiva. Ha lo scopo di regolare la domanda di trasporto urbano. Può rivolgersi esclusivamente a tutti i veicoli o a determinati gruppi e può essere modulato in base all’ora del giorno, al livello di congestione, al tipo di veicolo (per tenere conto delle esternalità ambientali correlate agli inquinanti pesanti e / o all’accesso privilegiato per i veicoli a basse emissioni), ecc.

Politiche nazionali per la logistica urbana

Il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti italiano ha recentemente sottoposto alla consultazione pubblica di stakeholders e cittadini i principali temi dei trasporti e della mobilità nell’ambito della Conferenza nazionale sulle infrastrutture, i trasporti e il territorio. A conclusione della consultazione relativa alla tematica della “City logistics”, sono state definite tre aree di intervento, comprendenti alcune linee d’azione specifiche.

- *Framework nazionale per l’adozione e lo sviluppo di politiche di City Logistics*
 - Modello di riferimento per l’implementazione di soluzioni specifiche
 - Definizione di un approccio standard per operatori economici e amministratori
 - Ottimizzazione delle procedure di accesso e regolamentazione
- *Architetture di servizio e di controllo per la gestione*
 - Definizione di un’architettura interoperabile dei sistemi informativi
 - Individuazione dei servizi standard necessari per la corretta gestione
 - Realizzazione di una piattaforma di controllo aperta e distribuita
- *Modelli operativi per la distribuzione delle merci*
 - Centrale di coordinamento

- Ottimizzazione dell'utilizzo delle piazzole di carico-scarico
- Individuazione dei portali di accesso
- Condivisione dei mezzi di trasporto merci
- Tracciamento e controllo dei percorsi

2.2 *Problematiche e opportunità tecnologiche per l'utilizzo di veicoli merci elettrici in campo urbano.*

Evoluzione del mercato dei veicoli stradali elettrici

La tecnologia alla base dei veicoli elettrici esiste da oltre un secolo, a partire dall'invenzione dell'automobile [15]. Esistono diverse forme di veicoli elettrici, distinti in base al grado di elettrificazione della trasmissione e alla capacità della batteria [16]; nella maggior parte dei casi, il motore elettrico è utilizzato per la propulsione mentre le batterie sono impiegate per l'accumulo di elettricità. L'energia delle batterie fornisce tutta la potenza motrice e ausiliaria a bordo del veicolo. Le batterie vengono ricaricate dall'elettricità di rete e dal recupero di energia dei freni. Potenzialmente, la ricarica può avvenire da fonti non di rete, come i pannelli fotovoltaici. Nel corso del XX secolo, furono prodotti diversi modelli di veicoli elettrici, ma nessuno fu ampiamente adottato dai consumatori poiché la propulsione elettrica subì la forte concorrenza del motore a combustione interna per la produzione di massa di automobili sin dall'inizio del XX secolo.

A partire dalla metà degli anni '90, i motori elettrici sono stati riproposti come tecnologia alternativa per la propulsione veicolare: in primo luogo, come veicoli puramente elettrici (Battery Electric Vehicle, BEV); più tardi come veicoli ibridi-elettrici (HEV). Fino al 1996, la produzione e la vendita di veicoli elettrici era dominata da piccole aziende al di fuori dell'industria automobilistica, in particolare la danese City EL. Di conseguenza, le vendite sono state di poche centinaia all'anno. Successivamente, le principali case automobilistiche hanno mostrato un crescente interesse per la commercializzazione dei loro veicoli elettrici (poco prima dell'introduzione dei requisiti ZEV della California per il 1996). Dopo la presentazione di prototipi nei principali saloni automobilistici, è iniziato il lancio di veicoli di produzione. La maggior parte delle case automobilistiche ha preferito elettrificare i modelli esistenti adottando una strategia iniziale a basso costo, quali Renault Clio, Peugeot 106, eccetera. Intorno al 2000, tuttavia, il mercato dei BEV era rimasto ancora molto ristretto come mercato del prodotto, principalmente a causa della gamma limitata e di un prezzo più elevato rispetto ai corrispondenti veicoli a combustione interna. In tutto il mondo, tra il 1995 e il 2000 non furono vendute più di poche migliaia di autovetture ogni anno. A partire dal 1997, alcune case automobilistiche lanciarono versioni ibride-elettriche (HEV). I veicoli ibridi hanno un'autonomia simile a quella dei veicoli a combustione interna. La Toyota presentò la Prius sul mercato giapponese nel 1997 e la Honda seguì con il lancio della sua Insight in California nel 1998. I prezzi inizialmente erano molto più alti di quelli degli analoghi veicoli a combustione interna, ma la Toyota inizialmente offrì uno sconto di circa il 10% su ogni veicolo per ridurre il prezzo di acquisto, riuscendo così a vendere nei primi anni più di 15.000 HEV ogni anno. Nel 1999 la Toyota Prius fu lanciata in California e successivamente in tutto il mondo, seguita da una Prius di seconda generazione nel 2004. Nel 2002 le vendite di HEV cumulate in tutto il mondo superarono i 100.000 veicoli, nel 2008 1,5 milioni. La quota di mercato nei Paesi Bassi ha raggiunto circa lo 0,5% nel 2005, salendo al 2% nel 2008. Negli Stati Uniti era circa il 4% nella prima metà del 2008. Nel 2005 le vendite all'estero del veicolo ibrido Toyota, principalmente negli Stati Uniti, avevano superato quelle del mercato interno [17].

Nel 2012 Tesla ha immesso sul mercato l'autovettura sportiva a trazione elettrica Model S, caratterizzata da grande autonomia ed elevate prestazioni. Da allora, le vendite di Tesla, con Model X e Model 3 che hanno affiancato Model S, sono cresciute fino a 367.500 veicoli nel 2019, con un incremento del 50% rispetto all'anno precedente.

A livello globale, la flotta di veicoli elettrici è cresciuta negli ultimi 10 anni in maniera esponenziale ed ha superato i 5 milioni di veicoli nel 2018, per il 96% concentrati in Cina, Europa, Stati Uniti e Giappone, raggiungendo una quota di vendite del 2% del mercato complessivo di autoveicoli (Figura 5), per arrivare, a novembre del 2019, a 7 milioni di veicoli (valore non rappresentato nella figura, relativa a dati annui).

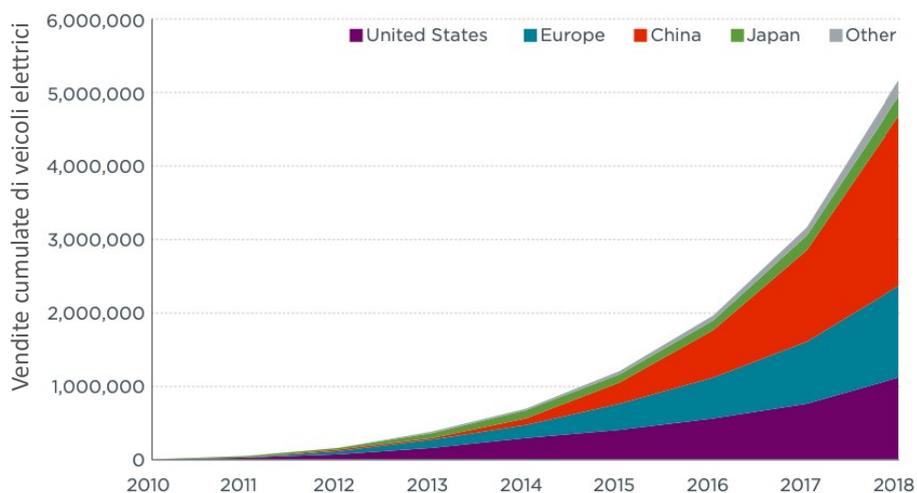


Figura 5. Vendite cumulate di veicoli elettrici nel mondo (ICCT, 2019)[18].

Per quanto riguarda i veicoli commerciali elettrici, la flotta complessiva, di entità trascurabile 10 anni fa, ha raggiunto in Italia circa 23.000 veicoli e ha di poco superato i 100.000 veicoli nel totale dell’Unione Europea, quasi interamente a batteria (Figura 6).

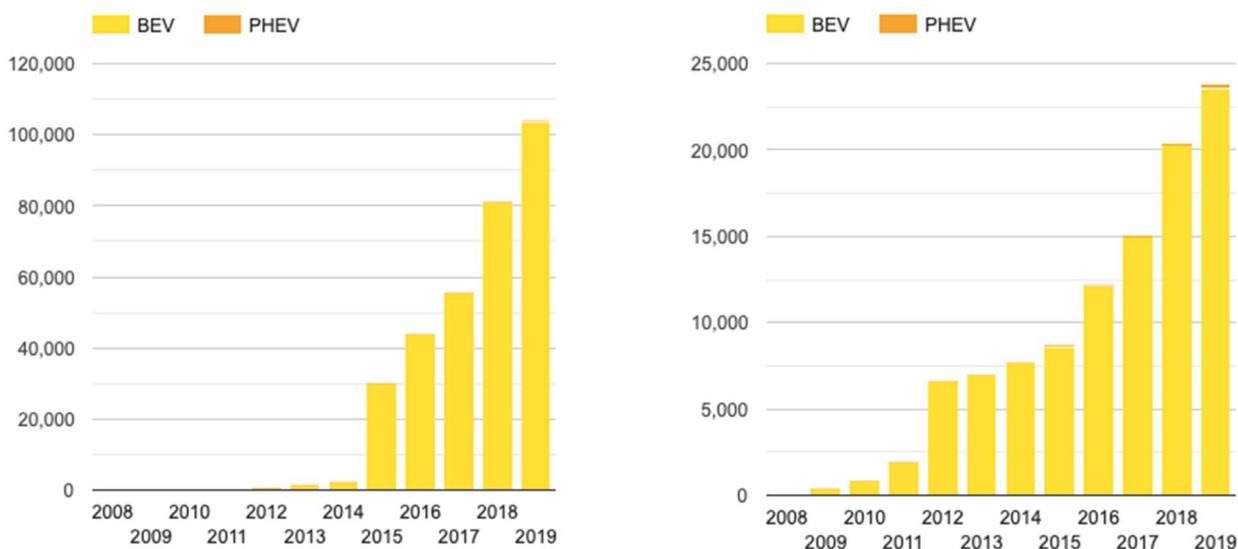


Figura 6. Parco veicolare di veicoli commerciali elettrici a batteria (BEV) e plug-in ibridi (PHEV) nell’Unione Europea (a sinistra) e in Italia (a destra) (European Alternative Fuels Observatory, 2019) [19].

Uso dei veicoli elettrici per la distribuzione delle merci

Oggi, diversi fattori di tipo “push” e “pull” alimentano l’interesse verso i veicoli elettrici per la logica distributiva urbana. Dal lato dei fattori di spinta (push), la limitata offerta di petrolio e la crescente consapevolezza dell’impronta ambientale dei veicoli con motore a combustione convenzionale aprono la strada a veicoli elettrici più puliti. Per quanto riguarda i fattori di traino (“pull”), i recenti sviluppi nella tecnologia delle batterie e dei motori elettrici rendono i veicoli elettrici un valido contendente per le auto convenzionali [20].

Nel settore delle spedizioni di piccoli pacchi (SPS), diverse grandi aziende, come DHL, UPS, DPD e Japan Post, hanno già iniziato a utilizzare i BEV per le consegne dell’ultimo miglio dai depositi ai clienti, in particolare nelle aree urbane. Il miglioramento della gamma di veicoli elettrici con autonomia fino a 400-500 km sarà un fattore chiave di successo nei prossimi anni. Alcune implementazioni compatibili con i veicoli leggeri consentono una riduzione delle dimensioni della batteria, con evidenti vantaggi in termini di peso, consumo

energetico e costi, fornendo al contempo ulteriori motivazioni per la realizzazione di sistemi distributivi urbani basati su veicoli elettrici.

Si prevede che le batterie elettriche saranno la fonte di combustibile dominante almeno a medio termine: i motori elettrici sono molto più semplici dei motori a combustione ed hanno un numero molto minore di componenti rispetto ai motori a combustione. Ciò significa che sono più economici da costruire e da mantenere, essendo più convenienti per gli acquirenti e allo stesso tempo riducendo alcuni dei vantaggi competitivi dei produttori, poiché il prodotto diventa meno specifico [21].

Per comprendere la futura tendenza del mercato dei BEV è anche importante considerarne la percezione sociale: per questo vengono brevemente riportati i risultati di un sondaggio realizzato da [20] in Belgio, ma generalizzabili anche per altri Paesi per i quali stimare la domanda potenziale di veicoli elettrici. I risultati del sondaggio, rivolto a 1196 persone, mostrano che il basso costo per chilometro, le prestazioni ambientali e la capacità di ricaricare presso la propria abitazione sono i principali vantaggi dei veicoli commerciali leggeri percepiti dagli intervistati; al contrario, l'alto prezzo di acquisto, l'autonomia di guida limitata e l'infrastruttura di ricarica limitata sono percepiti come i più importanti svantaggi dei BEV. Per il 49,5% degli intervistati è accettabile un raggio di 400 km. La velocità massima dei BEV non è considerato un elemento critico: l'81,9% del campione è soddisfatto con una velocità massima di 140 km/h, che molti BEV offrono già. Il 70,4% del campione è disposto ad aspettare dalle 4 alle 8 ore per ricaricare la batteria collegata a un caricabatterie lento, mentre il 68,8% della popolazione desidera che i caricabatterie veloci finiscano in un massimo di 15 minuti. Il governo svolge un ruolo importante nella fase di introduzione dei BEV e, secondo il sondaggio, dovrebbero investire nella standardizzazione dell'infrastruttura di ricarica, nell'installazione di caricabatterie veloci lungo la strada e nell'esenzione delle tasse (registrazione e tassa di circolazione). Infine, riguardo la disponibilità a pagare per i BEV, solo il 27% è disposto a pagare più di un'auto convenzionale.

Le principali criticità relative all'introduzione dell'elettricità come vettore di energia per i veicoli commerciali riguardano la capacità di fornire energia sufficiente per gli elevati livelli di domanda, l'elevato tempo di ricarica e la relativa autonomia: maggiore è l'autonomia, maggiore è il peso della batteria richiesta, che può arrivare a richiedere una percentuale significativa del carico utile potenziale. È importante, inoltre, l'effetto della velocità sul consumo energetico e quindi sull'autonomia. Se i veicoli elettrici sono guidati a velocità contenuta al di sotto di 60 km/h, la loro autonomia aumenta considerevolmente. Una problematica aggiuntiva che i veicoli commerciali presentano rispetto alle autovetture passeggeri riguarda la possibilità di utilizzare la ricarica regolare per le auto elettriche quando queste non sono in uso, specialmente durante il giorno nel parcheggio del luogo di lavoro o durante la notte presso la propria abitazione, e utilizzare la ricarica rapida durante il viaggio fermandosi in un punto di ricarica. Nel settore del trasporto merci, invece, è conveniente mantenere i veicoli in uso per il maggior tempo possibile (al limite, 24 ore su 24, 7 giorni su 7 per i camion autonomi); pertanto, interrompere la carica durante in viaggio non è conveniente. Questo problema, nonché il problema di peso sopra menzionato, potrebbero essere risolti con la possibilità di sostituire le batterie nelle stazioni di ricarica [21].

Per quanto riguarda il costo dei veicoli elettrici, questo è principalmente influenzato dal costo del sistema di batterie. Si prevede che i costi dei veicoli elettrici scenderanno da circa \$150/kWh a circa \$100/kWh nel 2025 e circa \$70/kWh in 2030, consentendo ai veicoli elettrici a batteria di raggiungere la parità di costo con i veicoli convenzionali entro il 2024-2025 per i veicoli a breve autonomia ed entro il 2026-2028 veicoli a lunga autonomia [22]. Peraltro, con la possibile riduzione di peso dei veicoli e le migliori prestazioni in generale dei veicoli elettrici, saranno necessari meno kWh per km.

Modellizzazione e analisi dei consumi energetici

L'adozione di veicoli elettrici per il trasporto di merci al posto degli autocarri diesel convenzionali nelle operazioni di prelievo o di consegna nelle aree urbane è una delle politiche in atto per ridurre emissioni inquinanti e sonore nelle aree più densamente abitate. Inoltre, i veicoli elettrici, anche dopo le perdite di energia nel processo di carica e scarica della batteria, sono circa due volte più efficienti dei veicoli convenzionali grazie anche alla presenza di dispositivi elettrici di altissima efficienza (oltre il 90%) nel gruppo propulsore ed alla possibilità del recupero di energia in frenata.

Le prestazioni dei veicoli elettrici per il trasporto di merci in termini di emissioni di gas di scarico e di rumore sono quindi l'aspetto cruciale per la loro applicazione nelle aree residenziali, come per la raccolta dei rifiuti e la consegna a domicilio di pacchi, mercati emergenti per i veicoli elettrici per il trasporto di merci. In particolare, le minori emissioni sonore dei veicoli elettrici sono percepite positivamente da residenti, passeggeri e conducenti [23].

Un aspetto di ricerca molto importante in questo contesto è la raccolta di dati reali e lo sviluppo di modelli di consumo di energia per i veicoli commerciali a trazione elettrica. Mentre le prestazioni dei veicoli elettrici passeggeri sono un campo ben esplorato, solo pochi lavori rilevanti sulla modellizzazione del consumo di energia dei veicoli commerciali a trazione elettrica sono presenti in letteratura, a causa della fase iniziale di penetrazione nel mercato.

Nell'ambito del progetto europeo FREVUE, finalizzato a dimostrare la fattibilità operativa dei veicoli elettrici per il trasporto di merci in otto grandi città europee, è stata svolta una estesa campagna di raccolta dei dati durante le operazioni di distribuzioni, nel periodo da giugno 2014 a novembre 2016, rilevando i consumi di 77 veicoli, aventi un peso lordo del veicolo compreso tra 2,2 e 19 tonnellate e batteria di capacità tra 22 kWh e 200 kWh, per una percorrenza complessiva di 757.000 km.

I risultati ottenuti sono riassunti nella Tabella 2 mostrano che l'energia spesa è, come previsto, fortemente correlata al peso lordo del veicolo. In media, questi indicatori sono circa quattro volte superiori per il gruppo di veicoli di grandi dimensioni rispetto al gruppo di veicoli di piccole dimensioni. Pur non essendo disponibili informazioni sul carico trasportato dai veicoli, è stato possibile calcolare l'energia spesa per peso lordo del veicolo e km percorsi. Questo indicatore mostra che il gruppo di veicoli di grandi dimensioni è potenzialmente altrettanto efficiente, o ancor più, degli altri gruppi di veicoli. Infatti, il chilometro per kWh diminuisce con il peso del veicolo e, dall'osservazione della flotta nel suo insieme, l'autonomia media (km) cresce con il peso del veicolo e la capacità della batteria perché aumenta per i veicoli più grandi.

Le principali conclusioni dello studio FREVUE, desunte dalle osservazioni effettuate durante le operazioni quotidiane di distribuzione logistica, sono le seguenti:

- i veicoli elettrici impiegati nell'ambito di FREVUE sono tecnicamente idonei per operazioni di logistica distributiva urbana;
- alcuni veicoli di piccole o medie dimensioni hanno una portata limitata e potrebbero richiedere una ricarica rapida durante la giornata lavorativa;
- la maggior parte dei veicoli di grandi dimensioni sembra avere una capacità della batteria sovrabbondante per le operazioni logistiche che stanno attualmente eseguendo;
- in prospettiva, la realizzazione di un'infrastruttura di ricarica rapida all'interno delle città e l'incremento di capacità della batteria contribuiranno a ridurre ulteriormente le barriere per l'utilizzo dei veicoli nella distribuzione urbana delle merci;
- a livello di sistema elettrico, sono da verificare gli effetti sulla capacità della rete elettrica locale di soddisfare il fabbisogno di energia, in particolare nei giorni feriali, in caso di maggiore diffusione dell'uso di veicoli elettrici, soprattutto autocarri, per il trasporto delle merci.

Tabella 2. Stime sperimentali dei consumi energetici di veicoli elettrici per la distribuzione urbana delle merci risultanti dal progetto europeo Frevue (2017) [24].

Classe di peso	Energia spesa giornaliera (kWh)	Energia spesa per km	Energia spesa per t·km	Km per kWh	Autonomia media (km)
< 3.5 t	16.2	0.23	0.12	4.8	106
3.5 - 7.5 t	23.0	0.65	0.11	1.9	115
>12 t	60.6	1.01	0.07	1.1	170
Media	29.0	0.65	0.10	2.2	124

Analisi SWOT dell'uso dei veicoli commerciali elettrici nel trasporto urbano delle merci

Nella letteratura tecnico-scientifica, come analisi sintetica delle ricerche sull'uso di veicoli elettrici per la distribuzione urbana delle merci, è stata svolta un'analisi SWOT (Strength-Weakness-Opportunities-Threats)

[24] che confronta i punti di forza e di debolezza, le opportunità e i rischi relativi all'uso di veicoli elettrici nella logistica urbana. Gli esiti sono sintetizzati nella Figura 7.

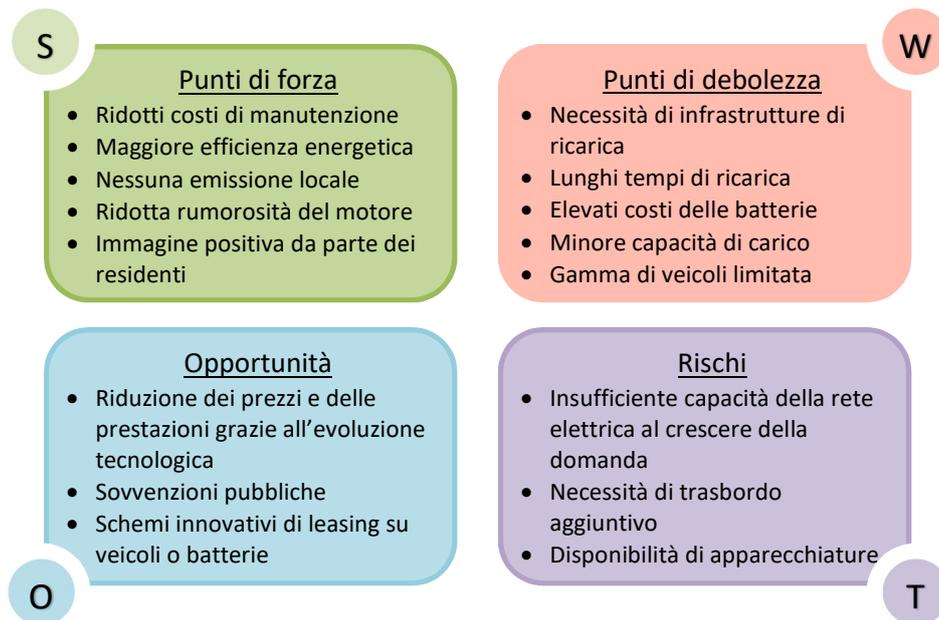


Figura 7. Analisi SWOT dell'uso di veicoli commerciali elettrici per la distribuzione delle merci in campo urbano.

L'analisi SWOT chiarisce che i principali punti di forza dei veicoli elettrici sono il valore ambientale e sociale. Le principali debolezze sono di carattere economico e operativo e principalmente si riducono al maggiore costo di acquisto rispetto ai veicoli a combustione interna e la limitata autonomia dei veicoli a batteria. Le opportunità risiedono nel miglioramento delle prestazioni tecniche dei veicoli, nel supporto finanziario previsto da interventi governativi che riducono il costo d'investimento per l'acquisto di veicoli elettrici leggeri e aumentano i vantaggi nella produzione su larga scala di batterie, contribuendo a ridurre i costi. Infine, le principali minacce sono legate al fatto che esiste un elevato livello di incertezza sulla disponibilità dell'attrezzatura in futuro, all'eventuale necessità di potenziare la rete elettrica per soddisfare la crescente domanda e all'inevitabilità di un trasbordo aggiuntivo nel trasferimento dal veicolo utilizzato per il trasporto di lunga percorrenza al veicolo elettrico per la distribuzione urbana.

2.3 Ottimizzazione della distribuzione urbana delle consegne di merci: Stato dell'arte.

Vehicle Routing Problem (VRP)

Il problema di organizzazione dei giri di consegna e di istradamento dei veicoli sui percorsi è alla base della gestione della distribuzione ed è di rilevante importanza pratica per tutte le aziende e organizzazioni impegnate nella consegna e nella raccolta di merci o persone. Questo problema è usualmente indicato, anche nella letteratura scientifica italiana, con il termine anglosassone *Vehicle Routing Problem (VRP)* è un problema di ottimizzazione NP-difficile (o NP-hard), che consiste nel determinare i percorsi di consegna o raccolta di minimo costo da uno o più depositi verso un numero di clienti distribuiti geograficamente, nel rispetto di un dato sistemi di vincoli [25].

Poiché le condizioni geografiche e operative variano da un'impostazione all'altra, gli obiettivi e i vincoli incontrati nella pratica sono molto variabili e hanno dato luogo ad una grande varietà di formulazioni.

Il *Vehicle Routing Problem* è stato originariamente introdotto nel 1959 da Dantzig e Ramser [26] come *Truck Dispatching Problem* e nel corso degli anni è stato integrato e modificato a seguito delle molteplici varietà ed estensioni proposte per incorporare vincoli e condizioni meglio corrispondenti alle esigenze delle applicazioni reali [27].

Le condizioni vincolari più comuni includono [25]:

- restrizioni di capacità: un peso non negativo è associato a ciascuna consegna e la somma dei pesi di qualsiasi giro di consegna del veicolo non può superare la capacità del veicolo stesso. I VRP con limite di capacità sono definiti CVRP (*Capacitated Vehicle Routing Problem*);
- numero di clienti: il numero di clienti (o città) da servire in qualsiasi giro è limitato;
- limiti di lunghezza o di tempo totale: la lunghezza o la durata di qualsiasi giro, comprensiva dei tempi di viaggio e di sosta, non può superare un limite prescritto. I VRP con vincoli temporali o di distanza sono definiti DVRP (*Distance-constrained Vehicle Routing Problem*);
- finestre temporali: il generico cliente deve essere visitato entro un determinato intervallo di tempo, in cui è compresa anche la sosta per le operazioni di carico o scarico. I VRP con limite di capacità sono definiti VRPTW (*Vehicle Routing Problem with Time Window*);
- relazioni di precedenza tra coppie di clienti o città: introduce il vincolo di ordinamento nella visita di un cliente rispetto ad un altro.

Nel classico *Vehicle Routing Problem* ad ogni cliente corrisponde una consegna, la domanda è deterministica, nota in anticipo e indivisibile, i veicoli sono identici e hanno sede in un unico deposito centrale. L'obiettivo del problema è di minimizzare il costo totale (cioè il numero di giri o la loro lunghezza o il tempo di viaggio) necessario per servire tutti i clienti. In generale, il costo del viaggio tra ciascuna coppia di posizioni dei clienti è lo stesso in entrambe le direzioni, ovvero la matrice dei costi è simmetrica; in alcune applicazioni, come per la distribuzione nelle aree urbane con strade a senso unico, la matrice dei costi può essere asimmetrica. Il VRP estende il noto *Traveling Salesman Problem* (TSP), ricercando la determinazione del circuito di costo minimo che visita esattamente una volta un insieme di punti determinato. Pertanto, molti approcci esatti per il VRP sono stati ereditati dall'enorme lavoro di ricerca svolto per la soluzione esatta del TSP [28].

Il *Vehicle Routing Problem* che comprende sia ritiri che consegne prende il nome di *Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivery* e viene indicato con VRPPD.

Varianti del *Vehicle Routing Problem* con veicoli elettrici (E-VRP)

Nel corso degli anni sono state studiate molte diverse varianti di VRP. Con l'aspetto BEV, i ricercatori hanno iniziato ad adattare al contesto del problema di routing di veicoli elettrici (E-VRP). A causa delle caratteristiche specifiche dei percorsi effettuabili con i BEV, sono emerse alcune nuove varianti specifiche del problema. Qui, vengono presentate alcune delle varianti E-VRP più rilevanti e i relativi problemi.

Numerosi vincoli pratici sono stati introdotti nei modelli di VRP per veicoli elettrici in modo da rispondere alle reali esigenze degli operatori della logistica che utilizzano i BEV per le consegne dell'ultimo miglio. In primo luogo, le restrizioni di capacità del veicolo devono essere prese in considerazione per la maggior parte delle tipologie di consegne. In secondo luogo, molte aziende, ad esempio nel settore dei corrieri espresso, affrontano un'alta percentuale di consegne con vincoli temporali, il che rende necessaria l'integrazione delle finestre temporali dei clienti nel modello di routing. Il secondo aspetto è particolarmente interessante in quanto i tempi di ricarica dei BEV non possono essere considerati fissi ma dipendono dalla carica della batteria del veicolo nel momento in cui arriva alla stazione di ricarica. Inoltre, le operazioni di ricarica possono richiedere una quantità di tempo anche notevole a seconda della tecnologia utilizzata, in particolare rispetto ai tempi relativamente brevi di assistenza clienti dei corrieri espresso, e quindi influenzano chiaramente la pianificazione del percorso [27].

Il primo tentativo di studiare le caratteristiche specifiche dei veicoli elettrici a batteria (BEV) in un VRP è stato realizzato da Gonçalves et al. [29], che hanno considerato un VRP con ritiro e consegna e una flotta mista, composta da veicoli commerciali leggeri sia elettrici che convenzionali. La limitata capacità della batteria era rappresentata da un limite di tempo per la ricarica dei BEV. L'approccio proposto ha generalizzato i precedenti problemi di vehicle routing con vincolo di distanza in quanto il vincolo viene esteso a considerare il tempo perso per la ricarica della batteria. Il modello di Gonçalves ha il limite di non considerare le posizioni dei punti di ricarica, il che implicherebbe che i BEV potrebbero ricaricarsi in qualsiasi punto del ciclo di consegna una volta che la batteria è scarica [30].

Conrad e Figliozzi [31] hanno formulato il problema del routing dei veicoli con ricarica, in cui hanno simulato il problema di consegne con veicoli elettrici di autonomia limitata assumendo con il rifornimento di energia possa avvenire presso i clienti visitati durante il percorso [32]: il problema è stato introdotto come estensione del VRP a distanza limitata (DCVRP).

Erdogan e Miller-Hooks [33] propongono il Green VRP, un modello di routing per veicoli a carburante alternativo. Il Green VRP considera una capacità di carburante limitata e la possibilità per i veicoli di fare rifornimento in apposite stazioni di rifornimento per carburanti alternativi. Per ogni rifornimento di energia e per ogni visita del cliente, viene considerato un tempo di servizio fisso; inoltre, si assume che la durata massima di un percorso sia limitata.

VRP con una flotta di veicoli eterogenei o misti

Il VRP con flotta mista prende in considerazione il percorso di una flotta di veicoli con costi di acquisto diversi e costi del percorso dipendenti dal tipo di veicolo. Goeke e Schneider [34] hanno formulato il VRP con finestre temporali e flotta mista considerando la stessa capacità di carico per i veicoli elettrici a batteria (BEV) o a combustione interna (ICV) e pari capacità della batteria per i veicoli elettrici. Nella ricerca pubblicata, gli autori hanno confrontato la percentuale di BEV rispetto alla distanza percorsa totale ottenuta con tre funzioni obiettivo: distanza percorsa totale, costi totali e costi totali esclusi i costi batteria. L'ipotesi alla base dello studio è che la distanza complessivamente percorsa con un pacco batteria sia di 150.000 miglia (241.350 km) e che il costo in caso di sostituzione sia di \$600 per kWh. I risultati dell'ottimizzazione del processo di distribuzione hanno mostrato che la convenienza ad utilizzare veicoli elettrici aumenta significativamente quando non sono considerati i costi della batteria, mentre negli altri due scenari è risultato conveniente utilizzare veicoli tradizionali per eseguire la maggior parte delle consegne. Hiermann et al. [35] hanno analizzato un problema simile, con differenti capacità di carico e di batteria, riscontrando una convenienza economica complessiva ad utilizzare una flotta di veicoli eterogenei. Nella maggior parte dei casi, infatti, nella soluzione finale vengono utilizzati da tre a quattro tipi di veicoli. Un'analisi simile su istanze di piccole dimensioni con diversi tipi di veicoli elettrici a batteria (BEV), a combustione interna (ICEV) e ibridi elettrici (HEV) è stata intrapresa da Lebeau et al. [30] hanno definito sette gruppi di tipi di veicoli che potrebbero essere utilizzati per la consegna, da piccoli furgoni e quadricicli con diversi scenari di flotte di veicoli solo diesel o solo elettrici o con tutti i tipi di veicoli. I risultati hanno condotto alle seguenti conclusioni: a) lo scenario con una flotta con diversi tipi di veicoli ha i minori costi di percorso totali; b) nel gruppo di furgoni, gli ICEV sono risultati più convenienti dei BEV; c) gli HEV si sono dimostrati più convenienti per le consegne effettuate con veicoli grandi. Hiermann et al. [36] hanno poi considerato il problema di vehicle routing di una flotta elettrica eterogenea ibrida con finestre temporali e stazioni di ricarica, in cui la flotta è costituita da ICEV, BEV e PHEV. Gli autori hanno confrontato i costi complessivi delle soluzioni ottenute con una flotta omogenea di ICEV, BEV e PHEV con la soluzione ottimizzata con una flotta mista. I risultati hanno evidenziato che, in soluzioni miste, i BEV sono preferiti per istanze raggruppate, gli ICEV per istanze distribuite casualmente e i PHEV in uno scenario misto, con istanze solo parzialmente raggruppate. Nel complesso, i risultati hanno mostrato che i costi operativi possono essere ridotti del 7% adottando una flotta eterogenea rispetto al caso omogeneo.

VRP con veicoli ibridi

Sul mercato sono presenti due tipi principali di veicoli a trazione ibrida: l'ibrido serie, in cui solo il motore elettrico agisce direttamente sulle ruote e il motore a combustione interna viene utilizzato per ricaricare il pacco batteria, e l'ibrido parallelo, che utilizza sia il motore a combustione interna che il motore elettrico per trasferire trazione alle ruote, laddove il motore elettrico è più efficiente in regime di stop-and-go e il motore a combustione interna è più efficiente ad alte velocità. L'ibrido plug-in (PHEV) è un ibrido parallelo che, potendo ricaricare le batterie direttamente dalla rete elettrica, consente di decidere durante il tragitto di funzionare con energia elettrica o con carburante fossile. Ciò consente la visita di clienti lontani dal deposito senza necessità di ricarica durante il percorso. Poiché i PHEV hanno due motori, hanno un consumo energetico unitario più elevato; tuttavia, non essendo necessaria la ricarica, il tempo impiegato per le consegne è più breve e anche la puntualità è maggiore. In uno dei primi lavori dedicati al problema di routing

dei PHEV, Abdallah definì il problema di vehicle routing con plug-in ibrido elettrico e finestre temporali assumendo che, in corrispondenza di ciascuna consegna, il conducente possa ricaricare la batteria del veicolo o passare alla successiva utilizzando il motore a combustione interna quando l'energia elettrica è esaurita. Doppstadt et al. [37] hanno considerato HEV che non sono plug-in e che si ricaricano solo durante la guida, con quattro modalità di funzionamento: sola combustione, solo elettrica, modalità di ricarica e modalità "boost", quando si utilizzano il motore a combustione interna combinato e il motore elettrico. Gli autori assumono che ogni mattina la batteria dei veicoli sia scarica a seguito delle consegne del giorno prima; pertanto, la carica iniziale della batteria è ipotizzata nulla. I risultati della ricerca hanno evidenziato gli effetti positivi dell'utilizzo degli HEV: a) rispetto agli ICEV, i costi complessivi nelle istanze testate sono diminuiti fino al 13% e i tempi di guida sono aumentati fino all'11%; b) i risparmi dipendono fortemente dalla posizione del deposito e non dalla capacità della batteria. Vincent et al. [38] hanno trattato il problema con PHEV e HEV leggeri. I risultati hanno mostrato che i PHEV hanno un costo medio per miglio inferiore in tutti gli scenari rispetto agli HEV e agli ICEV leggeri. Hiermann et al. [36] hanno ipotizzato l'uso del motore elettrico del PHEV come scelta della modalità prioritaria: solo quando viene violata una finestra temporale in un giro di un PHEV, la modalità può essere modificata in qualsiasi momento durante il giro scambiando il tempo di ricarica per la quantità di carburante corrispondente senza costi aggiuntivi. Gli autori hanno mostrato l'impatto positivo di una flotta PHEV rispetto alle flotte ICEV e BEV, in particolare per le istanze raggruppate casualmente. La configurazione ottimale della flotta comprende il 20% di PHEV, in quanto, a scapito dei maggiori consumi e costi di servizio, costituiscono comunque una componente importante della flotta a causa della loro flessibilità.

Il VRP con ricarica parziale

Nella maggior parte dei problemi VRP con veicoli elettrici, quando un BEV è transitato in una stazione di ricarica si ipotizza che svolga una piena ricarica. Questo può richiedere molto tempo perché, a seconda del livello di carica, della tecnologia di ricarica disponibile e della capacità della batteria, il veicolo può caricare da cinque minuti a otto ore [39]. Pertanto, nelle applicazioni della vita reale, dovrebbe essere presa in considerazione la ricarica parziale. La batteria dovrebbe essere sufficientemente carica per completare l'intero percorso o per superare il timore che l'autonomia del veicolo non sia sufficiente per eseguire compiti designati. Dal punto di vista economico, è possibile ottenere risparmi significativi applicando una ricarica parziale, in quanto potrebbe essere ricaricata una quantità di energia minima durante il giorno, quando il costo dell'elettricità e il carico della rete energetica sono più elevati, mentre il resto dell'energia potrebbe essere rifornito durante la notte. In alcuni casi, è opportuno mantenere una riserva di energia. Avere una riserva di energia è ancora più importante se si tiene conto del consumo di energia e dell'ansia da autonomia perché fino al 30% del consumo di energia può essere spesa sui dispositivi ausiliari. Limitare il valore di carica della batteria aiuta anche a preservare la batteria quando la capacità della batteria diminuisce sovraccaricando e scaricando eccessivamente [40]. Diverse pubblicazioni hanno analizzato strategie di ricarica parziale e hanno formulato il problema come VRP con ricarica parziale (Bruglieri et al. [41] e Moghaddam [42]). Felipe et al. [43] hanno considerato il caso dell'uso di più tecnologie e ricariche parziali, mentre Keskin e Çatay [44] hanno imposto il vincolo che, nel caso di un cambiamento nella configurazione del percorso, nella precedente stazione di ricarica il BEV viene caricato solo con la quantità di energia necessaria per completare il segmento di percorso fino alla stazione di ricarica successiva o al deposito. Ciò comporta la rimozione di alcune stazioni di ricarica nel percorso, rispetto alla strategia di ricarica completa, e il possibile arrivo di un veicolo al deposito con una batteria scarica. I risultati dello studio hanno evidenziato l'impatto positivo delle ricariche parziali sui costi totali e sul risparmio energetico. Una procedura simile è stata applicata da Sassi et al. [45] ma con più tecnologie di ricarica, diversi periodi di ricarica e controlli di compatibilità dei caricabatterie BEV. Diversi autori (a partire da Montoya et al. [46]) hanno formulato il problema di vehicle routing con percorsi fissi per BEV in cui, per una sequenza fissa di clienti nel percorso, devono essere ottimizzate la posizione della stazione di ricarica e la quantità della ricarica. I risultati di questi studi hanno mostrato che le migliori soluzioni tendono a sfruttare le ricariche parziali. Desaulniers et al. [47] ha presentato gli effetti della ricarica parziale risolvendo in modo ottimale le circostanze E-VRPT contenenti fino a 100 clienti. Nel caso di una singola ricarica per giro, la ricarica parziale ha ridotto i costi di percorso

dello 0,97% e il numero di veicoli del 2,25%, mentre in un caso di ricariche multiple per giro questi valori sono rispettivamente dell'1,91% e del 3,80%, ottenibili con un aumento significativo del numero medio di ricariche per giro.

Il VRP con diverse tecnologie di ricarica

Oggi sono presenti più tecnologie di ricarica: (i) lento, 3 kW (6-8 h); (ii) veloce, 7-43 kW (1-2 h); e (iii) rapido, 50-250 kW (5-30 min) [48]. Per controllare meglio i tempi di ricarica nel contesto EVRP, è possibile ottimizzare anche la selezione delle possibili tecnologie di ricarica. Ciò potrebbe rendere alcuni clienti con finestre temporali ristrette più accessibili caricando rapidamente in stazioni di ricarica precedenti ovvero, nel caso di clienti con finestre temporali lunghe, un approccio economicamente migliore potrebbe essere rappresentato dalla ricarica lenta. Tale problema potrebbe essere esteso tenendo conto delle ore di lavoro delle stazioni di ricarica, dei costi di ricarica dipendenti dal tempo, del numero di caricabatterie disponibili e della loro compatibilità con i BEV, del carico della rete elettrica, della potenza del caricabatterie, ecc.. Felipe et al. [43] hanno analizzato l'effetto delle diverse tecnologie di ricarica sui costi di ricarica ed hanno concluso che nessuna delle tecnologie è dominante rispetto alle altre. Le opzioni di ricarica rapida e veloce hanno fornito risultati leggermente migliori rispetto alla ricarica lenta, ma i risultati migliori sono stati ottenuti quando sono state utilizzate le tecnologie congiunte in quanto è possibile scegliere quella più appropriata in ciascun caso. Çatay e Keskin [49] hanno trattato il caso di consegne di piccole dimensioni e hanno mostrato che una ricarica rapida potrebbe ridurre le dimensioni della flotta e ridurre il costo dell'energia necessaria per far funzionare i BEV. Keskin e Çatay [50] hanno formulato il problema di *vehicle routing* con finestre temporali e ricarica rapida con ricariche parziali e tre diverse tecnologie di ricarica. Gli autori hanno confrontato due modelli di programmazione numerica misto-intero: nel modello 1 le variabili binarie vengono utilizzate come variabili di decisione per scegliere quale tecnologia di addebito utilizzare; nel modello 2, basato sul modello di Schneider et al. [27], gli autori hanno replicato ogni vertice di ciascuna stazione tre volte a seconda della tecnologia di ricarica. I risultati hanno mostrato che in tutti i casi il modello 1 ha prodotto risultati migliori con tempi di calcolo più brevi. I test su istanze più grandi hanno mostrato che l'opzione di ricarica rapida è più vantaggiosa quando i clienti hanno finestre temporali ristrette e che più tecnologie di ricarica hanno migliorato i risultati complessivi (in 28 di 29 casi), mentre nelle istanze con finestre temporali più grandi il miglioramento medio è stato dello 0,17%.

VRP di veicoli elettrici con funzione di ricarica non lineare

Nella maggior parte della letteratura relativa al problema di routing per veicoli elettrici, il tempo di ricarica viene assunto lineare o costante. La maggior parte dei BEV utilizza batterie agli ioni di litio, che spesso vengono caricate in fasi a corrente costante e voltaggio costante (CC-CV): prima a corrente costante fino a ca. 80% del valore della carica e quindi ad una tensione costante. Nella fase CC, la carica aumenta in modo lineare e nella fase CV la corrente diminuisce in modo esponenziale e la carica aumenta in modo non lineare nel tempo, prolungando il tempo di carica. Pochi lavori presenti in letteratura hanno considerato il processo di ricarica non lineare risolvendolo mediante linearizzazione per segmenti o stimando il tempo di ricarica con un approccio basato sui dati. Zündorf [51] ha sviluppato un algoritmo di propagazione della funzione di carica per determinare un percorso limitato dalla batteria EV prendendo in considerazione le funzioni lineari e concave a tratti del processo di ricarica. Montoya et al. [46] hanno formulato il problema con funzioni di carica lineari a tratti per stazioni di ricarica a 11, 22 e 44 kW e hanno approcciato il problema con una formulazione misto-intera. I risultati hanno mostrato che trascurare la non linearità della ricarica può portare a soluzioni impossibili o eccessivamente costose: il 12% dei giri nelle soluzioni selezionate ha ricaricato la batteria nella parte non lineare, dopo l'80% del valore della carica.

Problema di *Vehicle Routing* e Localizzazione delle stazioni di ricarica

A causa della quota di mercato dei BEV, attualmente modesta, anche il numero di stazioni di ricarica installate nella rete stradale è relativamente basso. Pertanto, il conseguimento di un grande potenziale di sviluppo risiede inevitabilmente nel processo decisionale simultaneo delle posizioni delle stazioni di ricarica e dei

percorsi dei BEV. Il classico *Location-Routing Problem* consiste nel determinare le posizioni dei depositi e le rotte dei veicoli che riforniscono i clienti di questi depositi.

Schiffer et al. [52] hanno presentato un caso di studio per la risoluzione di *location-routing problem* che, assumendo che le stazioni di ricarica possano essere localizzate presso le sedi dei clienti e che il tempo di servizio possa essere utilizzato per la ricarica. Nel complesso, i risultati hanno indicato la fattibilità della combinazione dell'ubicazione delle stazioni di ricarica e del routing BEV per casi specifici quando il raggio delle consegne non è molto lontano dal deposito. Schiffer e Walther [53] hanno confrontato le soluzioni del *location-routing problem* con quelle del semplice *vehicle routing problem* su istanze di test ridimensionate e hanno concluso che il problema di vehicle routing e localizzazione offre una soluzione migliore in tutti i casi. Il motivo deriva dal fatto che BEV può essere caricato durante il servizio, il che riduce il tempo complessivo del percorso, poiché non vi è alcun tempo di viaggio sprecato nel viaggiare da e verso una stazione di ricarica. Schiffer e Walther [56] hanno formulato il *Location-Routing Problem* come un problema più generale con strutture lungo il percorso che possono essere utilizzate per il rifornimento, il carico o lo scarico delle merci. Sun et al. [57] hanno proposto un modello di localizzazione per le stazioni di ricarica senza *routing*, ma basato sulle esigenze di viaggio dei residenti. Per i viaggiatori a breve distanza vengono utilizzate stazioni di ricarica lente, mentre per i viaggiatori a lunga distanza vengono considerate stazioni di ricarica rapide. Le posizioni delle stazioni di ricarica sono determinate per massimizzare la copertura e il flusso in base al concetto di rifornimento di carburante del veicolo.

VRP con sostituzione del pacco batterie (Battery Swap Stations, BSS)

Uno schema tecnologico alternativo prevede, invece di ricaricare le batterie dei veicoli nelle stazioni di ricarica, di sostituire le batterie scariche o quasi scariche con batterie completamente cariche [58]. I principali vantaggi di tale procedura sono il minor tempo in cui può essere eseguita l'operazione e la capacità di ricaricare quando il carico della rete energetica e i costi dell'elettricità sono inferiori, cioè durante la notte. Un'intera procedura di sostituzione potrebbe durare meno di dieci minuti, il che è competitivo per il tempo di rifornimento di carburante degli ICEV e molto più veloce di una delle tecnologie BEV a ricarica più rapida. Gli svantaggi di tale procedura sono le batterie non standardizzate e la loro installazione in BEV, il che rende difficile sostituire le batterie scariche con batterie completamente cariche. Hof et al. [54] e Yang e Sun [55] hanno affrontato il problema del *Location-Routing Problem* con la possibilità di sostituzione delle batterie. I risultati hanno indicato che, con il sistema di sostituzione delle batterie, riducendosi il costo di costruzione delle stazioni di ricarica, risulta conveniente aumentarne il numero. Adler e Mirchandani [59] hanno osservato il VRP con batterie intercambiabili, con posizioni di BSS già determinate, un numero fisso di batterie per BSS, una ricarica completa di quattro ore e un tempo di sostituzione fisso di due minuti. Viene considerata la ricarica completa della batteria, quindi è possibile che quando il veicolo arriva alla stazione, non vi sia alcuna batteria completamente carica disponibile e il veicolo debba attendere. Innanzitutto, il costo totale del percorso viene ridotto al minimo e quindi vengono effettuate le prenotazioni della batteria, in modo che il veicolo possa evitare i BSS senza batterie disponibili. Yang and Sun [55] e Hof et al. [54] hanno determinato simultaneamente le posizioni dei BSS e il piano di instradamento dei veicoli e hanno fornito diverse metaeuristiche per risolvere il problema. Yang e Sun hanno formulato il problema come problema di *location-routing* con sostituzione delle batterie e hanno confrontato le soluzioni delle istanze BSS-EV-LRP con le corrispondenti soluzioni del *vehicle routing* con vincolo di capacità più note. I costi di *routing* totali per 150 km e 300 km di autonomia sono aumentati rispettivamente al 7% e 3,5% e, in alcuni casi, non vi è stato alcun divario tra le diverse soluzioni. Hof et al. sullo stesso problema hanno riferito che se i costi di costruzione dei BSS fossero pari a zero, i BSS sarebbero costruiti nell'83% del totale dei siti candidati disponibili.

Problema di routing a due settori (2-Echelon Vehicle Routing Problem, E2EVRP)

Breunig et al. [60] hanno proposto il VRP elettrico a due settori (echelon), in cui le merci sono trasportate con modalità differenti in due settori: (i) nel primo settore, le merci sono trasportate da veicoli merci convenzionali dal deposito agli impianti satellitari; (ii) nel secondo settore, le merci vengono trasportate dagli impianti satellitari ai clienti con veicoli leggeri. Nel problema si osservano due tipi di veicoli: ICEV con capacità di carico maggiore situata nel deposito e BEV con capacità di carico inferiore situata nelle strutture satellitari.

I BEV vengono utilizzati per le consegne dell'ultimo miglio a causa del loro minore inquinamento, rumore e dimensioni. Gli autori hanno applicato procedure esatte su un numero di istanze più piccolo per risolvere il problema in modo ottimale e una procedura metaeuristica su un numero di istanze più grande. I risultati hanno mostrato che l'aumento della densità di stazioni di ricarica ρ ha ridotto i costi della deviazione secondo una legge $1/\rho^{1,24}$. Inoltre, la gamma di veicoli ha un grande impatto sulla qualità della soluzione: un'autonomia inferiore a 70 km ha prodotto soluzioni non realizzabili, mentre un'autonomia superiore a 150 km ha ridotto le soste alle stazioni di ricarica quasi a zero. Jie et al. [61] hanno analizzato un problema simile, il VRP condensato a due settori con sostituzione del pacco batterie, in cui, in entrambi i settori, vengono utilizzati BEV. I BEV nel primo scaglione hanno capacità di carico e batteria più elevate rispetto ai BEV nel secondo settore. Gli autori hanno concluso che l'autonomia della batteria è l'aspetto più importante del routing, che è meno dipendente dal numero di BSS utilizzati.

Vehicle Routing Problem con programmazione delle operazioni di ricarica

Molte aziende che utilizzano BEV preferiscono effettuare la ricarica elettrica dei veicoli presso le proprie strutture al fine di caricare i veicoli tra un giro di consegna e l'altro e durante specifici periodi della giornata. In questi sistemi, il deposito è dotato solitamente di un numero limitato di caricabatterie, in genere inferiore alle dimensioni della flotta; pertanto, è necessario determinare un programma di ricarica efficiente presso il deposito. Pelletier et al. [62] hanno preso in considerazione il problema della pianificazione della ricarica dei veicoli elettrici per il trasporto di merci presso il deposito per veicoli commerciali leggeri che consegnano merci a un insieme di clienti per più giorni. Gli autori hanno incluso più tecnologie di ricarica presso il deposito, un processo di ricarica realistico (linearizzazione a tratti della funzione di ricarica non lineare), costi di ricarica dipendenti dal tempo, limitazione dell'alimentazione di rete, costi di degradazione della batteria (invecchiamento ciclico e nel tempo) e la domanda di ricarica che rappresenta la domanda massima di energia elettrica registrata durante il periodo di fatturazione da ciascun deposito. I percorsi dei veicoli sono fissi e noti in anticipo. Gli autori hanno presentato i seguenti risultati dei test di programmazione della ricarica condotti nei periodi estivi (costi elettrici più elevati) e invernali (costi elettrici più bassi): (i) il modello cerca di mantenere il livello di carica più basso quando sono inclusi i costi di degradazione della batteria; (ii) in estate, i veicoli vengono caricati raramente nelle ore di punta, il che si traduce in una maggiore ricarica simultanea del veicolo o nell'uso di caricabatterie veloci che recuperano più energia dalla rete nelle ore non di picco ma comportano una domanda di ricarica per deposito più elevata; (iii) per evitare numerosi cicli di ricarica delle batterie nelle stazioni di ricarica, è preferibile suddividere i percorsi lunghi in percorsi più piccoli; (iv) i caricabatterie veloci sono ampiamente utilizzati in un contesto di utilizzo elevato di BEV; (v) limitazioni della potenza della rete elettrica aumentano i costi energetici complessivi, soprattutto nei mesi estivi, e possono portare a soluzioni non realizzabili se impongono limiti eccessivi al numero di veicoli che si caricano contemporaneamente; e (vi) i costi totali sono sempre inferiori con batterie più grandi, poiché batterie più piccole richiedono cicli di scarica più grandi. Barco et al. [63] hanno anche analizzato la pianificazione delle tariffe per i percorsi assegnati nel caso di una navetta aeroportuale. Gli autori hanno definito l'insieme di azioni di addebito (profilo di addebito) nell'orizzonte di programmazione determinato e hanno ridotto al minimo i costi operativi complessivi. Sassi et al. [45] si sono occupati di determinare il programma di ricarica dei BEV presso il deposito e hanno incluso costi di ricarica dipendenti dal tempo e controlli di compatibilità dei caricabatteria con i BEV. Adler e Mirchandani [59] hanno fornito un modello di routing online dei BEV prendendo in considerazione le prenotazioni della batteria per ridurre al minimo il ritardo medio di tutti i veicoli effettuandone occasionalmente una deviazione. Wen et al. [64] hanno osservato il tempo di servizio delle stazioni di ricarica e hanno proposto un modello di prenotazione della batteria per caricare la batteria prenotata nel periodo di tempo definito. Sweda et al. [65] hanno considerato la possibilità che una stazione di ricarica potrebbe non essere disponibile ad un certo punto nel tempo e la conseguente necessità di reindirizzamento. Il problema è formulato come politica adattativa di *routing* e ricarica per veicoli elettrici. Innanzitutto, sono state determinate le politiche di instradamento e ricarica a priori ottimali e quindi sono state applicate procedure euristiche per l'instradamento adattivo.

Condizioni di traffico dinamiche

Gran parte della ricerca sul *vehicle routing* con veicoli elettrici considera le condizioni statiche sulla rete stradale. Gli stati di traffico cambiano in modo ricorrente, a seconda dell'ora del giorno, del giorno della settimana e della stagione, e in modo non ricorrente quando si verifica un incidente di traffico, come un incidente. Il problema di *vehicle routing* dinamico instrada una flotta di veicoli tenendo conto del tempo di percorrenza variabile sulla rete stradale. Shao et al. [66] hanno osservato BEV in tale contesto dipendente dal tempo nel problema di *routing* con tempo di ricarica e tempo di viaggio variabile. Il tempo di ricarica è fissato a 30 minuti e le batterie vengono sempre ricaricate fino alla piena capacità. Gli autori hanno discretizzato un giorno in intervalli di due minuti e hanno applicato un algoritmo di Dijkstra dinamico per trovare il percorso di minimo tempo di viaggio con pesi nel grafo non costanti. Gli autori hanno presentato un problema reale e lo hanno risolto applicando un algoritmo genetico con un tempo di esecuzione di tre ore. Omidvar e Tavakkoli-Moghaddam [67] hanno presentato un modello per il routing di veicoli con carburanti alternativi che mira a evitare il routing durante le ore di congestione, quando i costi di inquinamento sono elevati, aspettando presso le sedi di un cliente. Questi costi sono stati calcolati in base al profilo di velocità della strada. Mirmohammadi et al. [68] hanno presentato la formulazione misto-intera per il VRP con traffico urbano dipendente dal tempo e finestre temporali, con l'obiettivo di minimizzazione delle emissioni. L'orizzonte di pianificazione delle consegne e delle ricerche è suddiviso in diversi periodi, durante i quali vengono considerate le condizioni del traffico statico.

3 Conclusioni

Il processo di distribuzione delle merci nelle aree urbane è una componente importante del sistema economico e ha conseguenze rilevanti sulla congestione stradale e sull'inquinamento atmosferico. Nel 2018 in Europa i trasporti hanno contribuito a circa il 15% delle emissioni globali di GHG e sono stati responsabili di circa il 30% del consumo di energia, del 36% delle emissioni di ossidi zolfo, del 47% di quelle degli ossidi di azoto e del 33% del particolato inferiore a 2,5 micron. Limitando l'analisi alle attività direttamente legate alla logistica, il contributo delle attività relative alla logistica è contenuto nell'ordine dell'1%. In valori assoluti, le emissioni dovute al settore della logistica assommano, in Europa, a circa 6.500 tonnellate di particolato, di cui 140 in Italia; a 23 milioni di tonnellate di GHG, di cui 2,3 in Italia; a circa 3100 tonnellate di ossidi zolfo, di cui circa 20 in Italia; a circa 100.000 tonnellate di ossidi di azoto, di cui circa 3.800 in Italia.

Uno degli obiettivi del Libro bianco dell'Unione Europea "Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti - Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile" del 2011 è di ottimizzare le prestazioni delle catene logistiche multimodali, anche facendo maggiore uso di modalità più efficienti dal punto energetico.

Le misure più efficaci per il contenimento degli impatti e il miglioramento dell'efficienza del sistema consistono nell'uso di veicoli elettrici per la distribuzione urbana e nella introduzione di un sistema di consolidamento dei carichi presso centri di distribuzione logistica. In considerazione della numerosità e varietà dei soggetti operanti nel settore della logistica urbana, un requisito molto importante richiesto per il successo delle politiche di gestione del trasporto delle merci nelle aree urbane è la ricerca del consenso e della cooperazione tra operatori, da realizzare attraverso la consultazione.

Il parco veicolare di veicoli commerciali elettrici a batteria in Italia è in continua crescita e nel 2019 ha superato i 20.000 veicoli. Le previsioni di riduzione del costo delle batterie da circa 150\$/kWh a circa 100\$/kWh nel 2025 e a 70\$/kWh nel 2030 lascia prevedere una maggiore convenienza dell'uso dei veicoli elettrici per la distribuzione urbana delle merci.

Dall'analisi della letteratura tecnica, sintetizzata in un'analisi SWOT, i principali punti di forza dei veicoli elettrici sono il valore ambientale e sociale. Le principali debolezze sono il maggiore costo di acquisto rispetto ai veicoli a combustione interna e la limitata autonomia dei veicoli a batteria. Le opportunità risiedono nel miglioramento delle prestazioni tecniche dei veicoli, nel supporto finanziario previsto da interventi governativi che riducono il costo d'investimento per l'acquisto di veicoli elettrici leggeri e aumentano i vantaggi nella produzione su larga scala di batterie, contribuendo a ridurre i costi. Infine, le principali minacce sono legate al fatto che esiste un elevato livello di incertezza sulla disponibilità dell'attrezzatura in futuro,

all'eventuale necessità di potenziare la rete elettrica per soddisfare la crescente domanda e all'inevitabilità di un trasbordo aggiuntivo nel trasferimento dal veicolo utilizzato per il trasporto di lunga percorrenza al veicolo elettrico per la distribuzione urbana.

Il processo di ottimizzazione della distribuzione urbana delle consegne di merci è stato abbondantemente studiato ed è oggetto di una imponente letteratura scientifica.

Il *Vehicle Routing Problem* è stato introdotto da Dantzig e Ramser nel 1959 e nel corso degli anni è stato integrato e modificato a seguito delle molteplici varietà ed estensioni proposte per incorporare vincoli e condizioni meglio corrispondenti alle esigenze delle applicazioni reali.

Le condizioni vincolari più comuni includono restrizioni di capacità, numero di clienti, limiti di lunghezza o di tempo totale, finestre temporali, ordinamento delle consegne.

Numerose varianti del problema riguardano la distribuzione delle merci con flotte di veicoli esclusivamente o anche in parte elettrici e introducono i vincoli di autonomia delle batterie, contemplando la possibilità di ricarica completa o parziale durante il percorso o quella di sostituzione delle batterie in stazioni appositamente attrezzate. Alcuni modelli includono la possibilità di ottimizzare la posizione delle stazioni di ricarica nell'area da servire considerando la possibilità di utilizzo di veicoli diversi e stazioni di ricarica con tecnologie differenti nelle aree periferiche e in quelle centrali dell'area urbana.

L'analisi della letteratura scientifica ha consentito di individuare le caratteristiche desiderate per l'algoritmo di ottimizzazione della distribuzione urbana: includere vincoli relativi alle finestre temporali e alla capacità di carico in peso e volume; includere il vincolo di autonomia delle batterie; considerare diverse tecnologie di ricarica, lenta o veloce; includere un modello di consumo energetico per le diverse tipologie di veicoli.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] J. Visser, A. van Binsbergen, and T. Nemoto, "Urban freight transport policy and planning," *First Int. Symp. City Logist.*, 1999.
- [2] European Environment Agency, "Greenhouse gas emissions from transport in Europe," *Eur. Environ. Agency*, 2019.
- [3] T. Letnik, M. Marksel, G. Luppino, A. Bardi, and S. Božičnik, "Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport," *Energy*, 2018.
- [4] CIVITAS, "Smart choices for cities: Making urban freight logistics more sustainable," 2015.
- [5] A. Stathopoulos, E. Valeri, and E. Marcucci, "Stakeholder reactions to urban freight policy innovation," *J. Transp. Geogr.*, 2012.
- [6] E. Maggi, "La logistica urbana delle merci. Aspetti economici e normativi." 2007.
- [7] L. Rotaris, R. Danielis, E. Marcucci, and J. Massiani, "The urban road pricing scheme to curb pollution in Milan, Italy: Description, impacts and preliminary cost-benefit analysis assessment," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, 2010.
- [8] J. Holguín-Veras, Q. Wang, N. Xu, K. Ozbay, M. Cetin, and J. Polimeni, "The impacts of time of day pricing on the behavior of freight carriers in a congested urban area: Implications to road pricing," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, 2006.
- [9] A. Comi, R. Donnelly, and F. Russo, "Urban Freight Models," in *Modelling Freight Transport*, 2013.
- [10] L. Dablanc, "Urban goods movement and air quality policy and regulation issues in European Cities," *J. Environ. Law*, 2008.
- [11] M. Hesse and J. P. Rodrigue, "The transport geography of logistics and freight distribution," *J. Transp. Geogr.*, 2004.
- [12] A. Comi and F. Russo, "City sustainability and urban freight transport: Environmental evidences from the cities," *2011 NUF-4th METRANS Natl. Urban Freight*, 2011.
- [13] Commissione Europea, "Libro bianco: Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti - Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile," 2011.
- [14] J. Allen, G. Thorne, and M. Browne, "Good practice guide on urban freight transport," *Bestufs Adm. Cent.*, 2007.

- [15] K. G. Høyer, “The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars,” *Util. Policy*, 2008.
- [16] J. Van Mierlo, G. Maggetto, and P. Lataire, “Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles,” *Energy Convers. Manag.*, 2006.
- [17] M. Dijk and M. Yarime, “The emergence of hybrid-electric cars: Innovation path creation through co-evolution of supply and demand,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, 2010.
- [18] ICCT, “Electric vehicle capitals: Showing the path to a mainstream market.” pp. 1–12, 2019.
- [19] European Alternative Fuels Observatory, “European Alternative Fuels Observatory, 2019.” 2019.
- [20] C. Macharis, P. Lebeau, J. Van Mierlo, and K. Lebeau, “Electric vehicles for logistics: a total cost of ownership analysis,” *2013 World Electr. Veh. Symp. Exhib.*, 2013.
- [21] J. Monios and R. Bergqvist, “The transport geography of electric and autonomous vehicles in road freight networks,” *J. Transp. Geogr.*, 2019.
- [22] N. Lutsey and M. Nicholas, “Update on electric vehicle costs in the United States through 2030,” *Int. Counc. Clean Transp.*, 2019.
- [23] T. T. Taefi *et al.*, “Comparative Analysis of European Examples of Freight Electric Vehicles Schemes— A Systematic Case Study Approach with Examples from Denmark, Germany, the Netherlands, Sweden and the UK,” 2016.
- [24] N. Nesterova, H. Quak, S. Balm, I. Roche-Ceraso, and T. Tretvik, “State of the art of the electric freight vehicles implementation in city logistics.” .
- [25] G. Laporte, “The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms,” *Eur. J. Oper. Res.*, 1992.
- [26] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, “The Truck Dispatching Problem,” *Manage. Sci.*, 1959.
- [27] M. Schneider, A. Stenger, and D. Goeke, “The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations,” *Transp. Sci.*, 2014.
- [28] P. Toth and D. Vigo, “1. An Overview of Vehicle Routing Problems,” in *The Vehicle Routing Problem*, 2002.
- [29] F. Gonçalves, S. R. Cardoso, S. Relvas, and A. P. F. D. Barbosa-Póvoa, “Optimization of a distribution network using electric vehicles: A VRP problem,” *Proc. IO2011-15 Congr. da Assoc. Port. Investig. Operacional*, pp. 18–20, 2011.
- [30] P. Lebeau, C. De Cauwer, J. Van Mierlo, C. Macharis, W. Verbeke, and T. Coosemans, “Conventional, Hybrid, or Electric Vehicles: Which Technology for an Urban Distribution Centre?,” *Sci. World J.*, 2015.
- [31] R. G. Conrad and M. A. Figliozzi, “The recharging vehicle routing problem,” in *61st Annual IIE Conference and Expo Proceedings*, 2011.
- [32] T. Erdelic, T. Carić, and E. Lalla-Ruiz, “A Survey on the Electric Vehicle Routing Problem: Variants and Solution Approaches,” *Journal of Advanced Transportation*. 2019.
- [33] S. Erdoğan and E. Miller-Hooks, “A Green Vehicle Routing Problem,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, 2012.
- [34] D. Goeke and M. Schneider, “Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles,” *Eur. J. Oper. Res.*, 2015.
- [35] G. Hiermann, J. Puchinger, S. Ropke, and R. F. Hartl, “The Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations,” *Eur. J. Oper. Res.*, 2016.
- [36] G. Hiermann, R. F. Hartl, J. Puchinger, and T. Vidal, “Routing a mix of conventional, plug-in hybrid, and electric vehicles,” *Eur. J. Oper. Res.*, 2019.
- [37] C. Doppstadt, A. Koberstein, and D. Vigo, “The Hybrid Electric Vehicle - Traveling Salesman Problem,” *Eur. J. Oper. Res.*, 2016.
- [38] V. F. Yu, A. A. N. P. Redi, Y. A. Hidayat, and O. J. Wibowo, “A simulated annealing heuristic for the hybrid vehicle routing problem,” *Appl. Soft Comput. J.*, 2017.
- [39] J. Martínez-Lao, F. G. Montoya, M. G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro, “Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017.
- [40] S. Pelletier, O. Jabali, G. Laporte, and M. Veneroni, “Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models,” *Transp. Res. Part B Methodol.*, 2017.

- [41] M. Bruglieri, F. Pezzella, O. Pisacane, and S. Suraci, "A variable neighborhood search branching for the electric vehicle routing problem with time windows," *Electron. Notes Discret. Math.*, 2015.
- [42] N. M. Moghaddam, "The partially rechargeable electric vehicle routing problem with time windows and capacitated charging stations," Clemson University, Clemson, SC, USA, 2015.
- [43] Á. Felipe, M. T. Ortuño, G. Righini, and G. Tirado, "A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, 2014.
- [44] M. Keskin and B. Çatay, "Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, 2016.
- [45] O. Sassi, W. R. Cherif-Khettaf, and A. Oulamara, "Multi-start iterated local search for the mixed fleet vehicle routing problem with heterogeneous electric vehicles," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2015.
- [46] A. Montoya, C. Guéret, J. E. Mendoza, and J. G. Villegas, "The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function," *Transp. Res. Part B Methodol.*, 2017.
- [47] G. Desaulniers, F. Errico, S. Irnich, and M. Schneider, "Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows," *Oper. Res.*, 2016.
- [48] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of charging power levels and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles," in *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC 2012*, 2012.
- [49] B. Catay and M. Keskin, "The impact of quick charging stations on the route planning of Electric Vehicles," in *Proceedings - IEEE Symposium on Computers and Communications*, 2017.
- [50] M. Keskin and B. Çatay, "A matheuristic method for the electric vehicle routing problem with time windows and fast chargers," *Comput. Oper. Res.*, 2018.
- [51] T. Zündorf, "Electric vehicle routing with realistic recharging models," Karlsruhe Institute of Technology, 2014.
- [52] M. Schiffer, S. Stütz, and G. Walther, "Are ECVs breaking even?: Competitiveness of electric commercial vehicles in medium-duty logistics networks," *Tech. Rep. G-2017-47*, RWTH Aachen Univ. Aachen, Ger., 2017.
- [53] M. Schiffer and G. Walther, "The electric location routing problem with time windows and partial recharging," *Eur. J. Oper. Res.*, 2017.
- [54] J. Hof, M. Schneider, and D. Goeke, "Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an AVNS algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops," *Transp. Res. Part B Methodol.*, 2017.
- [55] J. Yang and H. Sun, "Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles," *Comput. Oper. Res.*, 2015.
- [56] M. Schiffer and G. Walther, "An adaptive large neighborhood search for the location-routing problem with intra-route facilities," *Transp. Sci.*, 2018.
- [57] Z. Sun, W. Gao, B. Li, and L. Wang, "Locating charging stations for electric vehicles," *Transp. Policy*, 2018.
- [58] J. Q. Li, "Transit bus scheduling with limited energy," *Transp. Sci.*, 2014.
- [59] J. D. Adler and P. B. Mirchandani, "Online routing and battery reservations for electric vehicles with swappable batteries," *Transp. Res. Part B Methodol.*, 2014.
- [60] U. Breunig, R. Baldacci, R. F. Hartl, and T. Vidal, "The electric two-echelon vehicle routing problem," *Comput. Oper. Res.*, 2019.
- [61] W. Jie, J. Yang, M. Zhang, and Y. Huang, "The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: Formulation and efficient methodology," *Eur. J. Oper. Res.*, 2019.
- [62] S. Pelletier, O. Jabali, and G. Laporte, "Charge scheduling for electric freight vehicles," *Transp. Res. Part B Methodol.*, 2018.
- [63] J. Barco, A. Guerra, L. Muñoz, and N. Quijano, "Optimal Routing and Scheduling of Charge for Electric Vehicles: A Case Study," *Math. Probl. Eng.*, 2017.
- [64] M. Wen, E. Linde, S. Ropke, P. Mirchandani, and A. Larsen, "An adaptive large neighborhood search heuristic for the Electric Vehicle Scheduling Problem," *Comput. Oper. Res.*, 2016.

- [65] T. M. Sweda, I. S. Dolinskaya, and D. Klabjan, "Adaptive routing and recharging policies for electric vehicles," *Transp. Sci.*, 2017.
- [66] S. Shao, W. Guan, B. Ran, Z. He, and J. Bi, "Electric Vehicle Routing Problem with Charging Time and Variable Travel Time," *Math. Probl. Eng.*, 2017.
- [67] A. Omidvar and R. Tavakkoli-Moghaddam, "Sustainable vehicle routing: Strategies for congestion management and refueling scheduling," in *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition, ENERGYCON 2012*, 2012.
- [68] S. H. Mirmohammadi, E. B. Tirkolaee, A. Goli, and S. Dehnavi-Arani, "The periodic green vehicle routing problem with considering of time-dependent urban traffic and time windows," *Int. J. Optim. Civ. Eng.*, pp. 143–156, 2016.

5 Appendice

Gaetano Fusco è professore associato di Trasporti presso l'Università di Roma "La Sapienza", dove insegna *Traffic Engineering and Intelligent Transportation Systems*. Dal 1992 al 2005 è stato ricercatore presso la stessa Università. Nel 2014 ha conseguito l'abilitazione come professore ordinario.

È esperto tecnico-scientifico del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca e membro del Consiglio direttivo del Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica (CTL) dell'Università di Roma "La Sapienza". È coordinatore scientifico di numerosi progetti di ricerca finanziati da parte di società private ed enti pubblici e, in particolare, responsabile scientifico delle valutazioni di impatto sulle politiche dei trasporti della Commissione Europea, Direzione DG TREN, poi DG MOVE, svolte in un consorzio coordinato dalla società PricewaterhouseCoopers.

È autore di circa 100 pubblicazioni scientifiche sulla letteratura nazionale ed internazionale inerenti varie tematiche dei sistemi di trasporto, quali la progettazione delle reti di trasporto, la logistica e la pianificazione dei trasporti, la modellazione e la stima della domanda di trasporto, la teoria del deflusso veicolare, ma prevalentemente focalizzate sulle metodologie di applicazioni dei Sistemi di Trasporto Intelligenti, quali la regolazione semaforica, i sistemi di informazione all'utenza, la stima delle condizioni di traffico.

Stefano Ricci è Professore Ordinario di Trasporti all'Università di Roma La Sapienza, dove insegna *Railway Transport; Maritime Transport e Tecnica ed economia dei trasporti*. È Presidente del Consiglio d'Area Didattica dell'Ingegneria dei Trasporti, Direttore del Master di Secondo Livello in Ingegneria delle Infrastrutture e dei Sistemi Ferroviari e Direttore della rivista scientifica "Ingegneria Ferroviaria". Svolge attività di ricerca nell'ambito dei progetti finanziati dalla Comunità Europea (DG TREN, Research e INFSO) e nazionali nel settore trasporti. Le sue aree di specializzazione sono: pianificazione dei trasporti, esercizio e sicurezza ferroviaria, valutazione ambientale del sistema dei trasporti, esercizio del trasporto pubblico, trasporto marittimo e intermodale. Ha di recente collaborato nei seguenti progetti europei: AEROTRAIN, ASSETS4RAIL, CAPACITY4RAIL, CLEANER-DRIVE, DYNOTRAIN, ECORAILS, ELEDRIE, EURNEX, HEROE, INWAPO, IN2RAIL, NEAR2, OPTIYARD, PANTOTRAIN, RACAM, RIFLE, RUN2RAIL, SELCAT, SESAMO, TILEMATT, UTOPIA, VITE. È autore di oltre 190 pubblicazioni scientifiche.

Chiara Colombaroni è Ricercatore e Professore aggregato di Trasporti all'Università di Roma La Sapienza, dove insegna *Programming for Transport Systems*. Nella medesima Università, ha conseguito la Laurea in Ingegneria dei trasporti nel 2003, la Laurea Magistrale in Ingegneria dei sistemi di trasporti nel 2006 e il dottorato di ricerca in Infrastrutture e Trasporti nel 2011. Nel 2013 è stata Ricercatore e Professore aggregato presso l'Università Niccolò Cusano di Roma, dove ha insegnato *Tecnica ed Economia dei Trasporti e Tecnologie per il Trasporto Sostenibile*.

Le sue attività di ricerca sono rivolte alla pianificazione dei trasporti e alla modellazione dei trasporti, in particolare la teoria del deflusso veicolare, i modelli comportamentali di guida, i sistemi di controllo del traffico, la progettazione di rete, la sicurezza stradale, l'ottimizzazione del posizionamento dei container nei terminal intermodali, l'uso dei Big data in mobilità.

Filippo Carrese è ingegnere dei trasporti e studente di dottorato in Infrastrutture e trasporti presso l'Università di Roma La Sapienza. La sua attività di ricerca verte sulle applicazioni del concetto di accessibilità nei sistemi di trasporto, sia in relazione alla mobilità dei passeggeri che alla distribuzione delle merci.