



Ricerca di Sistema elettrico

Applicazione del software di gestione della distribuzione con veicoli
elettrici su un caso di test

G. Fusco, C. Colombaroni, F. Carrese, N. Isaenko

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE EDILE E AMBIENTALE



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Report RdS/PTR(2020)/061

APPLICAZIONE DEL SOFTWARE DI GESTIONE DELLA DISTRIBUZIONE CON VEICOLI ELETTRICI SU UN CASO TEST

G. Fusco, C. Colombaroni, F. Carrese, N. Isaenko

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: Tecnologie

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

Work package: Mobilità

Linea di attività: LA 2.23 - Sviluppo informatico del modulo di ottimizzazione dell'e-last mile

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 DEFINIZIONE DEL FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA LOGISTICO.....	6
2.1 AREA DI STUDIO.....	6
2.1.1 <i>Rete di Trasporti</i>	7
2.1.2 <i>Infrastrutture di Ricarica</i>	9
2.2 PUNTI DI CONSEGNA.....	9
2.3 POSIZIONAMENTO DEL DEPOSITO.....	11
2.4 FLOTTA.....	12
3 ANALISI DEI RISULTATI.....	13
3.1 OTTIMIZZAZIONE.....	13
3.2 SIMULAZIONE.....	15
4 ANALISI DI SENSIBILITÀ.....	18
4.1 ANALISI DI SENSIBILITÀ DELLA SOLUZIONE AI PARAMETRI DELL'ALGORITMO.....	18
5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	20
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	21
7 APPENDICE.....	22

Sommario

Il presente rapporto tecnico descrive l'applicazione del software di gestione della distribuzione con veicoli elettrici su un caso di test.

Come caso test è stata considerata l'area metropolitana di Roma, rappresentata da un grafo composto da 125.954 archi direzionati e 102.486 nodi.

La tipologia di delivery points, scelta per il caso test, sono negozi di libri, 117 in totale, distribuiti uniformemente sull'area oggetto dell'applicazione.

È stato considerato un solo deposito con una sola finestra temporale per effettuare le consegne, dalle 8:00 alle 14:00.

Per l'applicazione del software di ottimizzazione day-to-day sono state utilizzate le 86 infrastrutture di ricarica disponibili su Open Street Map (OSM), con una potenza di ricarica associata a ciascuna colonnina di 25 kW.

La flotta di veicoli necessaria per effettuare tutte le consegne all'interno dell'unica finestra temporale è composta da 6 veicoli elettrici, di due diverse dimensioni. Per il calcolo dei consumi sono state utilizzate le funzioni COPERT, opportunamente modificate per adattarle al caso di veicoli elettrici.

È stata inoltre eseguita un'applicazione del software di recovery, in cui è stato simulato un caso improvviso di esaurimento della batteria di uno dei veicoli. L'algoritmo ha quindi modificato l'itinerario del veicolo in questione per inserire una fermata intermedia all'infrastruttura di ricarica più vicina. Dopo aver verificato che non vengano violati i vincoli di autonomia e delle finestre temporali, l'itinerario viene salvato con l'aggiunta della nuova rotta e la simulazione riprende dal timestep successivo.

1 Introduzione

Il trasporto delle merci rappresenta una componente rilevante della mobilità complessiva nelle aree urbane; 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 concentrazione dei carichi nella distribuzione nell'ultimo miglio consente di riservare la distribuzione nei Centri Storici a veicoli elettrici, 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 ICT per la pianificazione ed ottimizzazione *day-to-day* della distribuzione urbana delle merci, oggetto tipico dei sistemi di SCP (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 e monitoraggio dello stato di occupazione.

Nel primo anno di progetto, il problema è stato affrontato in termini metodologici, e ne sono stati analizzati i requisiti funzionali, le caratteristiche operative e gli algoritmi risolutivi.

Nel secondo anno di progetto è stato realizzato il software prototipale per la piattaforma di gestione della distribuzione di merci con veicoli elettrici, è stato predisposto il manuale d'uso ed è stata studiata un'applicazione del software ad un caso di test, relativo alla distribuzione di libri ad un campione significativo di librerie comprese nell'area metropolitana di Roma.

Il presente rapporto tecnico è relativo a questa applicazione ed è articolato come segue. Dopo questa Introduzione, la Sezione 2 definisce il funzionamento del sistema logistico, descrive sommariamente l'area di studio, i punti di consegna e la flotta di veicoli per la distribuzione delle merci; la Sezione 3 descrive l'applicazione del software nella simulazione di una giornata-tipo; la Sezione 4 riporta i risultati

dell'analisi di sensibilità rispetto ai parametri dell'algoritmo risolutivo; infine, le Conclusioni riassumono le principali avvertenze per l'applicazione del software e la sua integrazione nel modello complessivo di analisi dei consumi elettrici della mobilità urbana.

2 Definizione del funzionamento del sistema logistico.

2.1 Area di studio

Per verificare la validità e l'efficienza del software di ottimizzazione del processo distributivo delle merci con veicoli elettrici è stata scelta come caso di studio l'area metropolitana di Roma, comprendente, oltre i 15 municipi del comune di Roma, anche le aree del comune di Fiumicino e dei quattro comuni limitrofi più prossimi dei Castelli romani, ovvero Ciampino, Frascati, Marino e Grottaferrata.



Figura 1: Area di Studio

L'area del caso di studio copre 1575,62 km², ed ha a una popolazione di 3063085 di abitanti. Secondo l'ufficio di statistica di Roma Capitale, nell'area operano in totale 285412 unità locali attive (dati al 31.12.2017). Tra queste, il settore di attività economica in cui è concentrato il maggior numero di unità locali di imprese attive è quello del commercio, che rappresenta circa il 31,6% del totale. Il numero di addetti, nelle unità locali del comune di Roma è di 1172690, a questi si vanno a sommare i 51076 addetti nei comuni di Fiumicino e dei Castelli. La tabella seguente mostra la

distribuzione di popolazione, area, e di unità locali attive nelle diverse zone coperte nel caso test.

Tabella 1: Dati socioeconomici dell'area di studio

Zone	Popolazione	Unità locali attive	Area (km²)
Municipio I	170328	48859	20.09
Municipio II	168410	27730	19.66
Municipio III	205832	14291	98.03
Municipio IV	175921	13566	48.94
Municipio V	245073	22126	26.92
Municipio VI	257556	17129	113.88
Municipio VII	307184	29567	45.84
Municipio VIII	130784	11789	47.15
Municipio IX	183343	14885	183.31
Municipio X	231701	14860	150.74
Municipio XI	155652	11973	71.48
Municipio XII	141141	11958	73.07
Municipio XIII	133367	11824	66.93
Municipio XIV	192000	11647	133.55
Municipio XV	160795	11807	187.31
Castelli	78887	7641	213.25
Fiumicino	125111	3760	77.6

2.1.1 Rete di Trasporti

Per rappresentare la rete stradale è stato usato il grafo TeleAtlas, da cui è stato estratto il grafo trasportistico utilizzato per le applicazioni che devono coprire l'area interessata, composto da 125954 archi direzionali e 102486 nodi. La lunghezza media degli archi stradali è di 86 metri. Archi e nodi sono gli elementi fondamentali per la costruzione e l'esecuzione dell'algoritmo di Vehicle Routing. La loro localizzazione geografica è illustrata rispettivamente in Figura 2 e in Figura 3.



Figura 2: Rete stradale (archi)



Figura 3: Rete stradale (nodi)

2.1.2 Infrastrutture di Ricarica

Per l'applicazione sono state considerate le 86 infrastrutture di ricarica riportate su Open Street Map (OSM), la cui localizzazione è illustrata in Figura 4. Corrispondono al 20% circa delle colonnine presenti nell'area, che si ipotizza, tra parziale occupazione delle colonnine e compatibilità delle prese di ricarica, siano mediamente disponibili. La potenza di ricarica associata a ciascuna colonnina è di 25 kW.

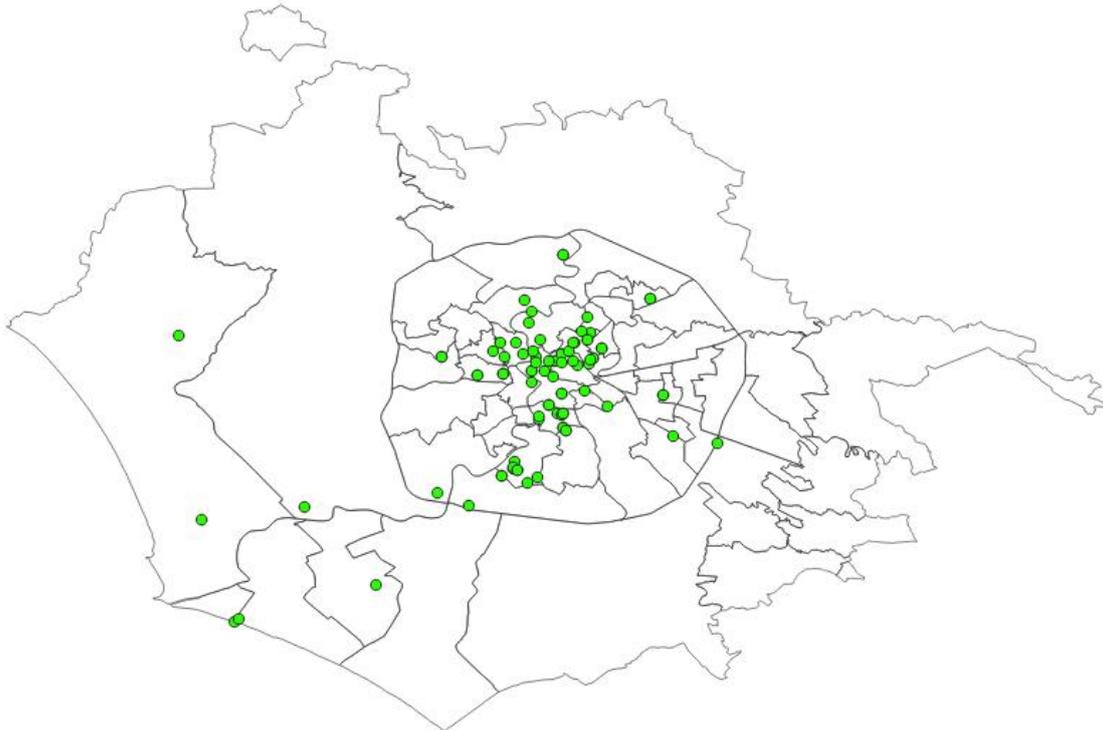


Figura 4: Infrastrutture di ricarica

2.2 Punti di consegna

La distribuzione di merci oggetto del caso di studio è costituita da un insieme di 117 librerie e cartolerie, rappresentanti altrettanti punti di consegna, localizzate prevalentemente nella città di Roma e provincia e per una quota minore in alcuni centri dei Castelli Romani e del litorale. La Figura 5 illustra la localizzazione dei punti di consegna e i confini amministrativi delle zone.

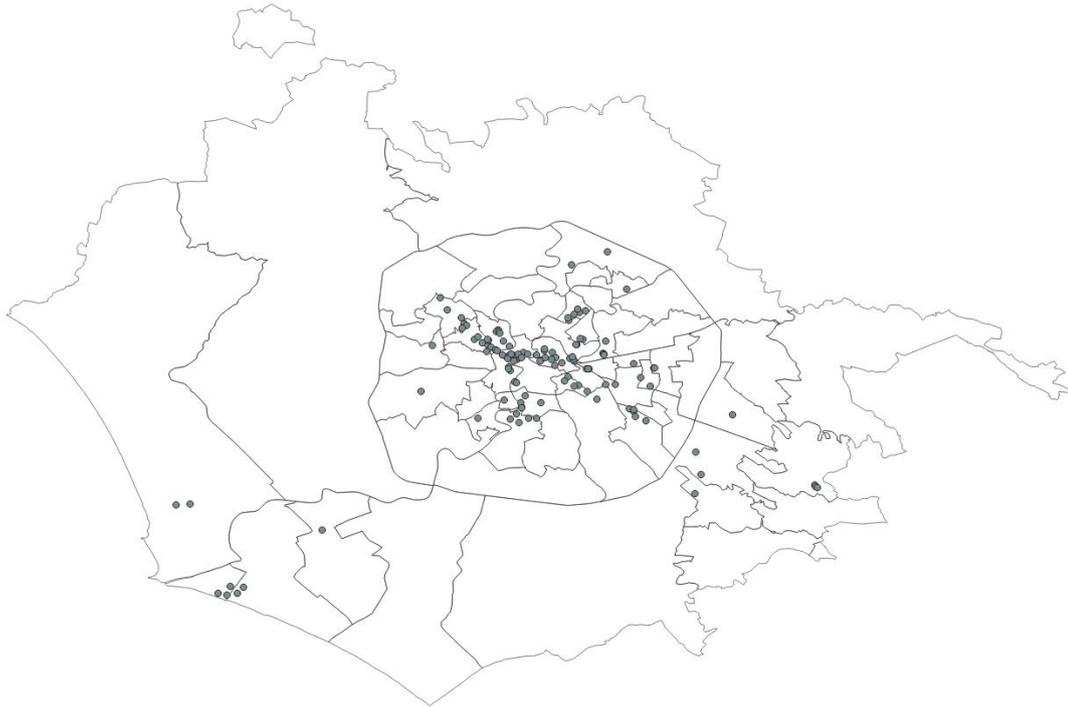


Figura 5: Punti di consegna (117 librerie)

In mancanza di osservazioni dirette del processo, sono stati ipotizzati volumi di carico realistici (in media 250 kg e 0.115 m² a consegna, prossimi a quelli ottenuti in una indagine compiuta sul trasporto merci nel Centro storico di Roma [1]). I valori di test sono stati ottenuti tramite un'estrazione casuale tra un minimo di 50 kg e 0.75 m², e un massimo di 450 kg e 1.5 m². Non è stata considerata nessuna correlazione tra peso e volume della domanda relativa a un singolo punto di consegna, sia per tener conto della variabilità tra le due grandezze sia per dare maggiore significatività ai vincoli di peso e di volume nel caricamento dei veicoli. La somma della domanda in peso è di 31 tonnellate, e occupa un totale di circa 140 m³. La finestra orario delle consegne è dalle 8:00 alle 14:00 per tutti i punti di consegna. Nella Tabella 2 vengono riportate le prime righe della tabella delle consegne nel formato richiesto dal software di ottimizzazione.

Tabella 2: Prime righe del file dei punti di consegna

Delivery Point ID	Delivery Point Longitude	Delivery Point Latitude	Demand_kg	Demand_m3	Time Window Startv[min dalle 00:00]	Time Window End [min dalle 00:00]	Date [YYYYMMDD]
13800204878731	12.4912621	41.8995853	0	0	0	0	20210325
13800205536726	12.4772305	41.8812603	194	1.05	480	780	20210325
13800205541264	12.5236041	41.8897588	396	1.28	480	780	20210325

Il primo record nell'elenco delle consegne corrisponde al deposito e alle relative coordinate. La scelta della posizione del deposito deriva da una applicazione dell'algoritmo stesso, di cui è riportata una spiegazione dettagliata nel paragrafo 2.3 seguente.

2.3 Posizionamento del deposito

Il software è stato inizialmente utilizzato per determinare il posizionamento ottimale del deposito per le successive applicazioni. Questa rappresenta una funzionalità aggiuntiva del software, che compete più ad una fase di pianificazione che di gestione quotidiana, che si ritiene tuttavia interessante per un supporto "a tutto tondo" degli operatori della logistica urbana.

Come possibili alternative iniziali sono stati considerati i 59 centroidi delle zone che costituiscono l'area di studio, con l'obiettivo di stimare la lunghezza media di un ipotetico giro al variare del luogo del deposito. Per considerare gli aspetti stocastici della distribuzione, ovvero il variare del numero e dei luoghi delle consegne, è stato preso in considerazione un campione di 5313 negozi da Open Street Map, in modo da avere una rappresentazione realistica della distribuzione di eventuali punti di consegna sul territorio. Per ognuna delle 59 zone in cui si è ipotizzato di localizzare il deposito, è stata fatta una media di 40 applicazioni del modello per determinare la lunghezza media del giro che dovrebbe compiere un veicolo per consegnare a 10 negozi estratti casualmente dal campione tra tutti quanti i punti della intera area di studio.

In Figura 6 viene mostrato il risultato di questa applicazione, la colorazione di ogni zona indica la lunghezza media del giro per servire 10 negozi con un solo veicolo, partendo e ritornando dal deposito all'interno della zona stessa.

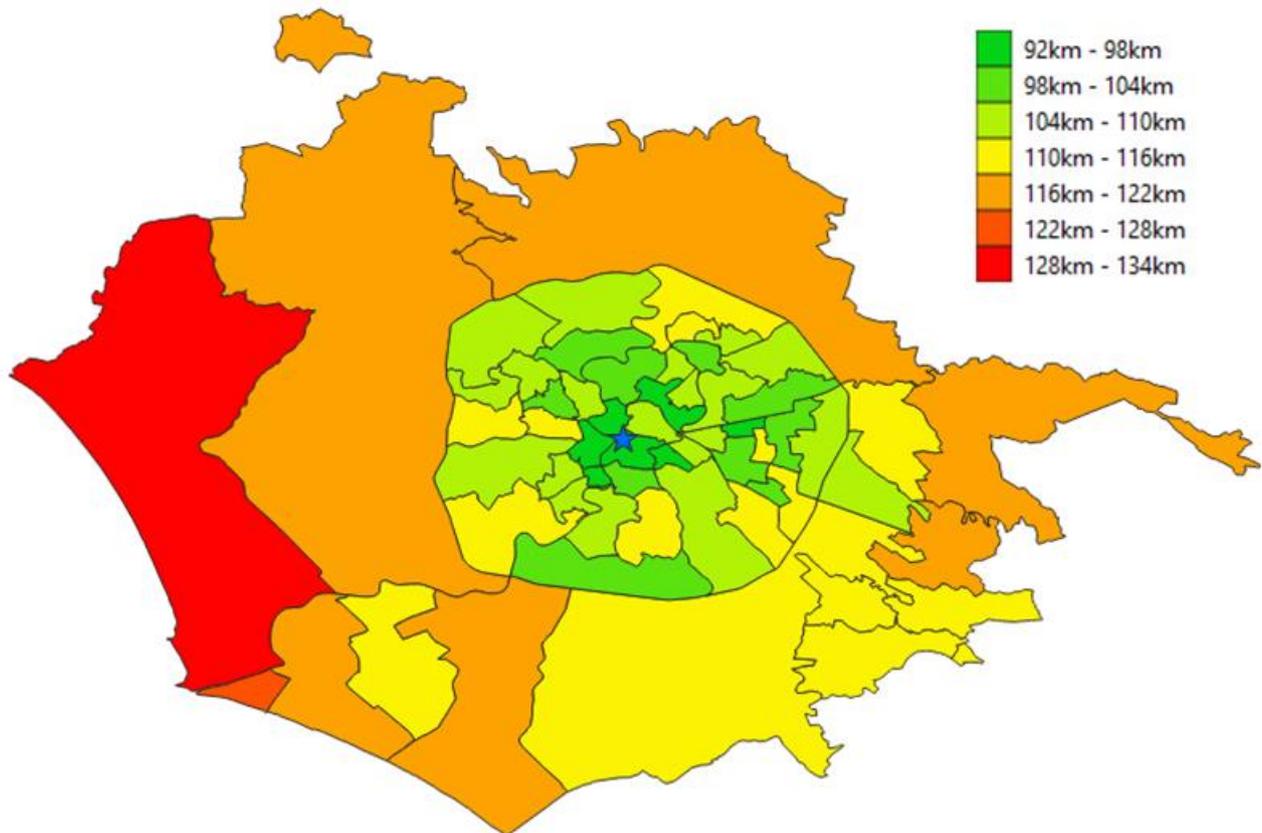


Figura 6: Lunghezza media del giro in funzione della posizione del deposito

Come prevedibile, la localizzazione del deposito nelle zone più periferiche genera giri mediamente più lunghi. Questo non è solamente dovuto alla maggiore connessione delle zone centrali con tutte le altre zone, ma anche a una distribuzione non omogenea dei negozi, maggiormente presenti nelle aree del centro. La stella blu indica la posizione del deposito utilizzata nelle applicazioni successive, corrispondente al centroide che genera la minor lunghezza media dei giri di consegna.

2.4 Flotta

La flotta è costituita da 6 veicoli elettrici, 3 grandi, con una portata di carico di 7 tonnellate e 30 m³, e 3 medi, con una portata di carico di 3.5 tonnellate e 20 m³. Per entrambe queste tipologie di veicoli le funzioni di consumo e i relativi parametri erano stati stimati in un precedente studio [2].

Per la risoluzione del problema di ottimizzazione delle consegne, il software richiede le seguenti informazioni sulle caratteristiche della flotta: tipo di veicolo, peso, capacità della batteria, capacità di carico in termini di peso e di volume, tempi medi di carico e scarico merci, al deposito ed in corrispondenza dei punti di consegna.

Tabella 3: Prime righe del file della flotta

Vehicle ID	Vehicle Type	Gross Weight [kg]	Max Charge [kWh]	Weight Capacity [kg]	Volume Capacity [m3]	Vehicle Load Time [min]	Delivery Unload Time [min]
1	Large	12500	240	7000	30	30	5
2	Midi	7000	150	3500	20	25	5

3 Analisi dei risultati

3.1 Ottimizzazione

L'ottimizzazione dei giri di consegna corrispondenti ai dati esposti nei paragrafi precedenti è stata effettuata utilizzando i valori di default riportati in Tabella 4 per i parametri dell'algoritmo di Simulated Annealing.

Tabella 4: Parametri dell'ottimizzazione

T0	Tend	L	Q
10 ²	10 ⁻⁽²⁾	1000	0.99

La progressione del processo di ottimizzazione verso la soluzione è illustrata in Figura 7. Per effettuare le 117 consegne, l'algoritmo è partito da una soluzione composta da 19 giri di una lunghezza complessiva di oltre 1200 km, arrivando a un itinerario in cui risultano necessari solo 6 giri, con un fattore di carico medio del 76% e con soli 284 km da percorrere. Con i parametri utilizzati, volutamente fissati su valori elevati per verificare il processo di convergenza, l'algoritmo si ferma dopo 917 iterazioni in cui è stato cambiato il valore del parametro esterno (temperatura). Dall'esame della figura si nota un primo tratto composto da ampi ma saltuari miglioramenti della soluzione, una parte intermedia in cui le variazioni sono pressoché continue, e un tratto finale in cui la soluzione non viene più migliorata. In pratica, la soluzione (sub)ottima viene raggiunta dopo circa 500 iterazioni.

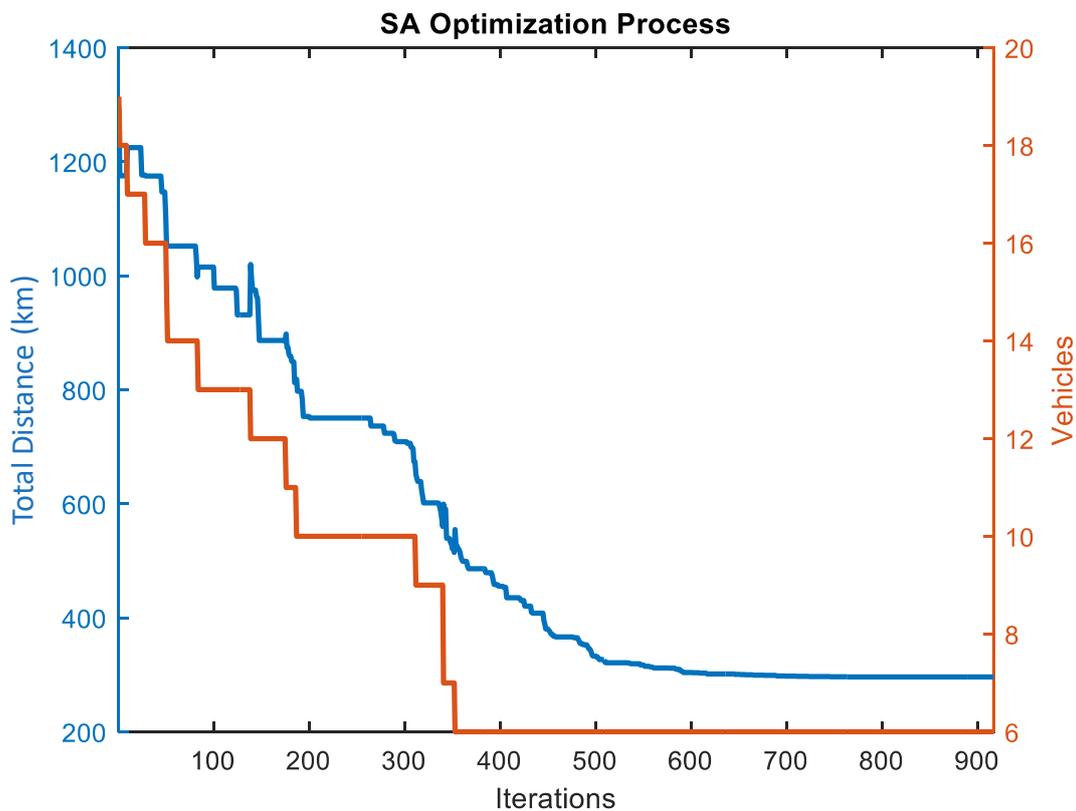


Figura 7: Numero dei veicoli (in rosso) e distanza complessiva percorsa (in blu) alle varie iterazioni

Il tempo di elaborazione per il completamento dell'ottimizzazione è di 21 minuti, utilizzando un PC con una frequenza base del processore di 3.00 GHz e con 42 GB di RAM, e la versione di MATLAB R2019b. Ripristinando la soglia di convergenza a 10^{-2} , la soluzione (sub)ottima viene raggiunta dopo circa 15 minuti. È da osservare che il tempo di esecuzione non è un fattore limitante perché l'ottimizzazione viene effettuata in pianificazione, quando gli ordini di consegna sono stati acquisiti e prima di iniziare le operazioni di carico, generalmente la notte.

In Figura 8 sono riportati i giri risultanti dall'ottimizzazione, ciascuno contrassegnato con un colore diverso. I punti indicano i luoghi delle consegne, mentre le linee ne indicano la successione.

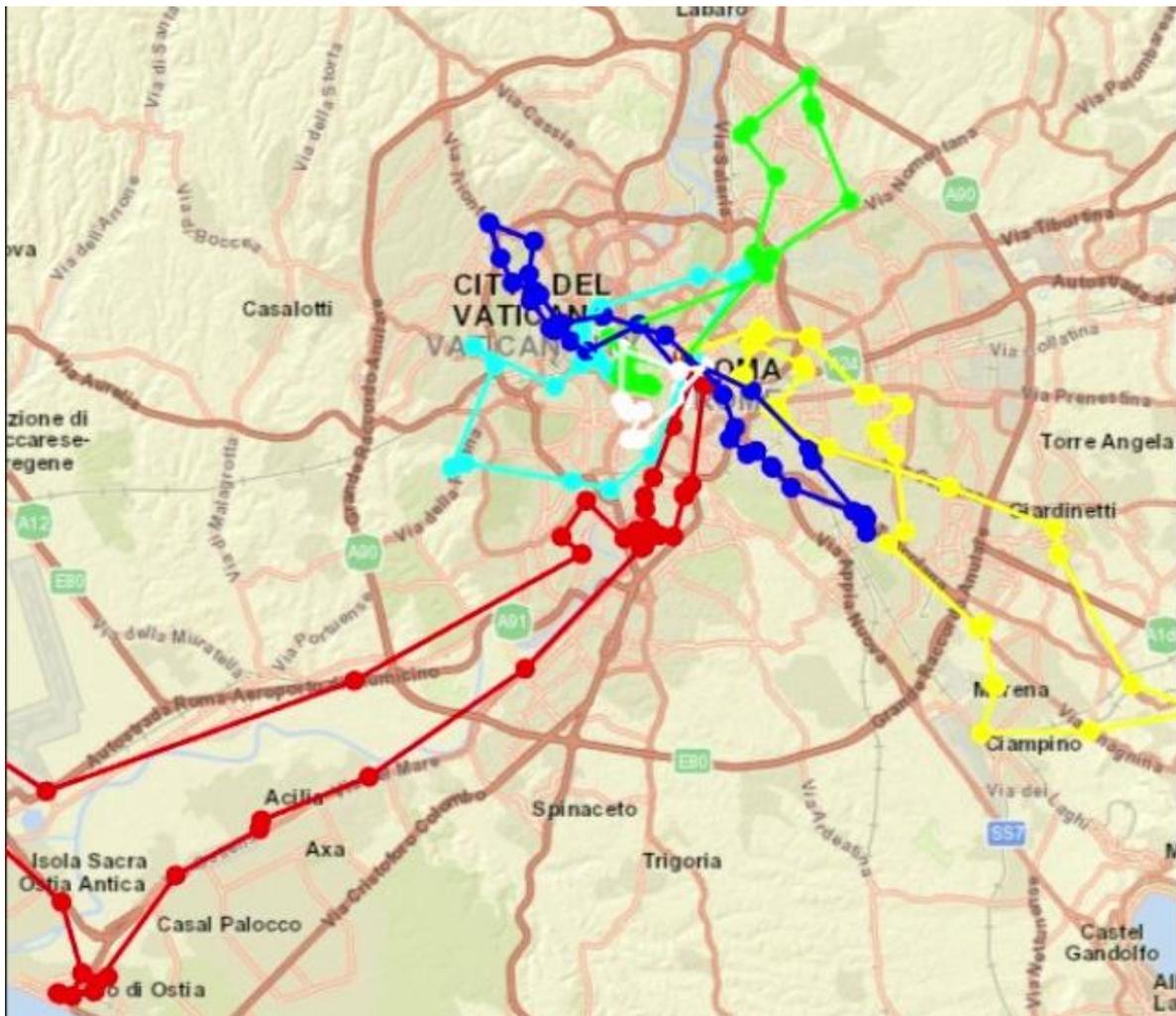


Figura 8: Mappa dei giri di consegna

3.2 Simulazione

Sui risultati ottenuti dalla ottimizzazione nel paragrafo precedente, è stato riprodotto in modalità di simulazione il processo di monitoraggio delle consegne, con la possibilità di tracciare ad ogni step temporale la posizione dei veicoli e il relativo stato di carica. Gli input richiesti dal software e utilizzati per la simulazione sono riportati in Tabella 5:

Tabella 5: Parametri della simulazione

Date [aaaa/mm/gg]	TimeStep [min]	simulationStart [min]	simulationEnd [min]
20210325	5	480	1080

L'orario di inizio e fine simulazione è espresso in minuti a partire dalle 00:00 del giorno calendario di simulazione.

Per il calcolo dei consumi elettrici sono state utilizzate le funzioni COPERT (Tabella 6, Tabella 7, Tabella 8, Tabella 9), appositamente adattate con coefficienti di trasformazione per stimare i consumi di veicoli elettrici a partire da osservazioni sperimentali di confronto tra veicoli a combustione interna e analoghi veicoli a trazione elettrica.

Tabella 6: espressioni delle curve di consumo [Wh/km] COPERT per veicoli IC da 7 tonnellate

Carico del veicolo	Espressioni delle curve di consumo [Wh/km]
0% < p < 30%	$y(V) = (e + (a \cdot \exp^{-bx}) + (c \cdot \exp^{-dx})) \cdot 12.72$
31% < p < 70%	$y(V) = ((a \cdot x^b) + (c \cdot x^d)) \cdot 12.72$
71% < p < 100%	$y(V) = (((c \cdot x^2) + (b \cdot x) + a)^{-1}) \cdot 12.72$

Tabella 7: coefficienti delle curve di consumo [Wh/km] COPERT per veicoli IC 7 tonnellate

Carico del veicolo	a	b	c	d	e
0% < p < 30%	1.014595	-0.04122	187.4573	0.077275	75.34241
31% < p < 70%	0.001	2.55885	438	-0.4216	
71% < p < 100%	0.003614	0.000219	-1.9E-06		

Tabella 8: espressioni delle curve di consumo [Wh/km] COPERT per veicoli IC da 7 tonnellate

Carico del veicolo	Espressioni delle curve di consumo [Wh/km]
0% < p < 30%	$y(V) = [e + (a \cdot \exp^{-bx}) + (c \cdot \exp^{-dx})] \cdot 12.72$
31% < p < 70%	$y(V) = [e + (a \cdot \exp^{-bx}) + (c \cdot \exp^{-dx})] \cdot 12.72$
71% < p < 100%	$y(V) = [c + (a \cdot \exp^{bx})] \cdot 12.72$

Tabella 9: coefficienti delle curve di consumo [Wh/km] COPERT per veicoli IC 7 tonnellate

Carico del veicolo	a	b	c	d	e
0% < p < 30%	486,6406	0,080972	1196063	1,629846	134,0512
31% < p < 70%	474,497	0,07433	10230354	1,9942	146,568
71% < p < 100%	503,41	-0,07251	160,5909		

I coefficienti di trasformazione in funzione degli intervalli di velocità sono riportati in Tabella 10. Espressioni delle curve di consumo [Wh/km] COPERT per veicoli IC

Tabella 10. Fattori di conversione (F.C.) da veicoli a combustione interna e veicoli elettrici a batteria

V0	V1	C.F.
11	15	0.2863
16	20	0.28429
21	25	0.28605
26	30	0.28645

Per ciascun timestep, l'algoritmo di simulazione calcola la posizione dei veicoli per porla sulla mappa e calcola i consumi per valutare lo stato di carica dei veicoli. Un esempio del risultato del monitoraggio, come visualizzabile a schermo e memorizzato su file di testo, è riportato in Figura 9.

```
Simulation Time: 8:50
current charge for vehicle 1 is: 241.6889
current charge for vehicle 2 is: 239.8802
current charge for vehicle 3 is: 241.1252
current charge for vehicle 4 is: 228.9337
current charge for vehicle 5 is: 238.2119
current charge for vehicle 6 is: 240.9289
```

Figura 9: Output dello stato di carica dei veicoli

La modalità di simulazione è stata utilizzata inoltre per eseguire un'applicazione del recovery, in cui è stato simulato un caso improvviso di esaurimento della batteria di uno dei veicoli. Raggiunta la soglia di sicurezza prefissata, l'algoritmo di recovery procede a modificare l'itinerario del veicolo in questione per inserire una fermata intermedia all'infrastruttura di ricarica più vicina. Per questo, è stata sviluppata una specifica routine che consente di limitare l'area entro la quale eseguire la ricerca della stazione di ricarica raggiungibile nel tempo più breve. L'algoritmo procede quindi a calcolare i cammini minimi dalla posizione corrente del veicolo verso tutte le stazioni di ricarica comprese entro l'area precedentemente definita e a selezionare la stazione raggiungibile nel tempo minimo. Sostituisce quindi l'itinerario definito in pianificazione con il nuovo, che include la stazione di ricarica e un'eventuale diversa sequenza delle consegne, se più conveniente. Nota la carica residua della batteria e la potenza di ricarica della stazione, l'algoritmo calcola il tempo necessario per la ricarica e trasla conseguentemente gli orari di consegna ancora da effettuare, modificandone eventualmente l'ordine, se più conveniente, dato il nuovo percorso. Dopo aver verificato che non vengano violati i vincoli di autonomia e delle finestre

temporali, l'itinerario viene salvato con l'aggiunta del nuovo itinerario (visualizzato in

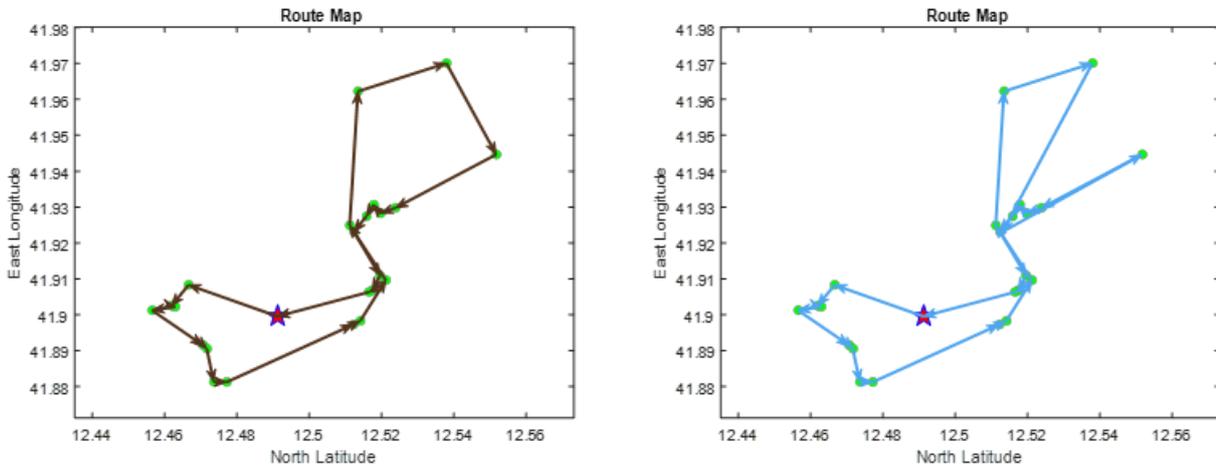


Figura 10) e la simulazione riprende dal timestep successivo.

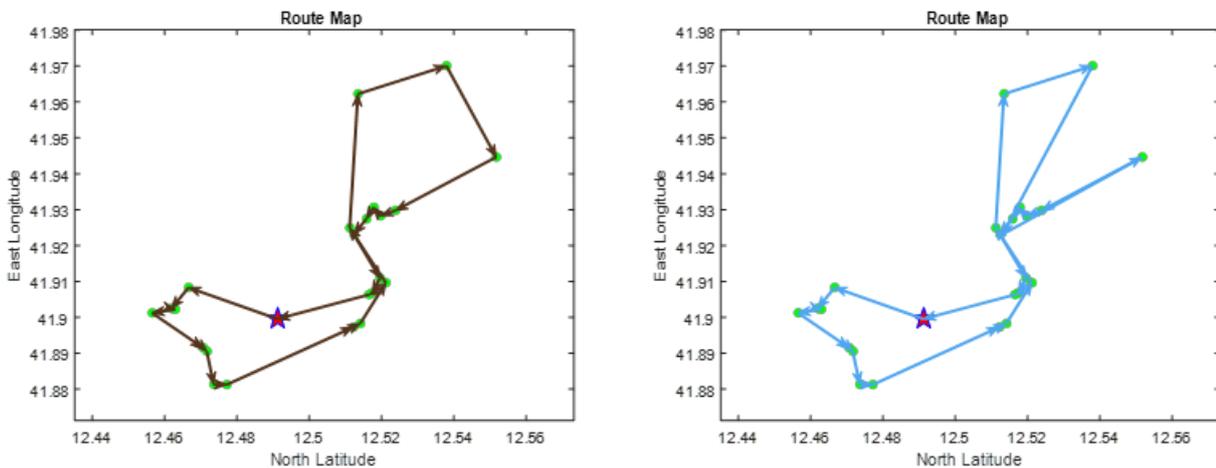


Figura 10: Modifica del percorso e inserimento di fermata presso una stazione di ricarica

4 Analisi di sensibilità

4.1 Analisi di sensibilità della soluzione ai parametri dell'algoritmo

Poiché la soluzione degli algoritmi meta-euristici, come il simulated annealing, dipende dai parametri utilizzati per definire la strategia di ricerca della soluzione, si rende opportuna un'analisi di sensibilità della qualità della soluzione (coefficienti di utilizzazione del carico, tempo e distanza totale percorsa, necessità di ricariche intermedie). La Figura 11 mostra, a titolo esemplificativo, la differenza tra due applicazioni in cui vengono cambiate solamente le temperature di inizio e di fine ottimizzazione. Nell'immagine a sinistra, il parametro di temperatura, che determina il numero di iterazioni, varia da un valore massimo di 10^2 ad un minimo di 10^{-5} , mentre nella figura di destra la temperatura varia da 10^5 a 10^{-2} .

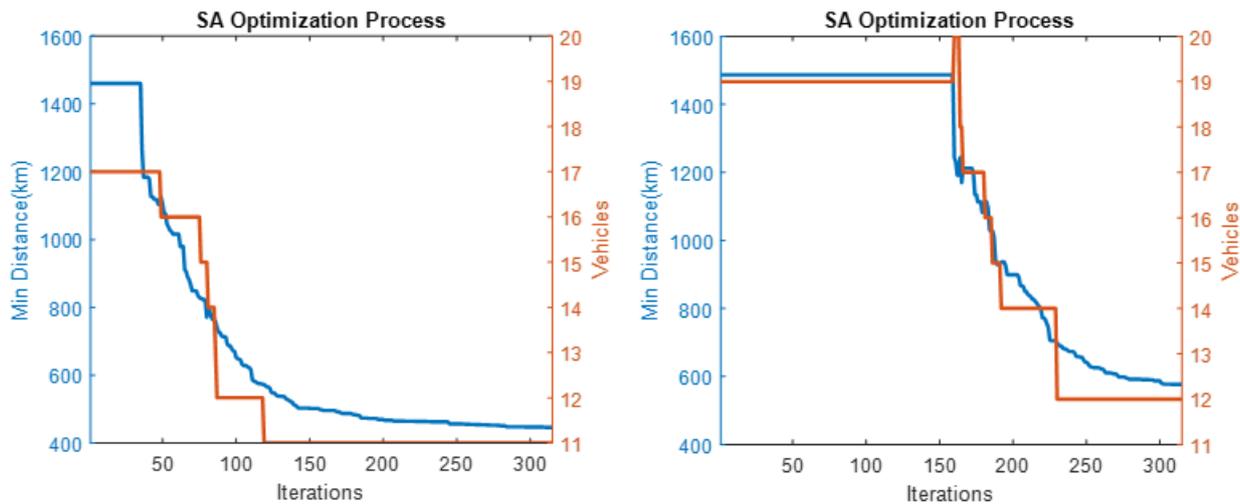


Figura 11: Risultato iterazioni ottimizzazioni per diverse temperature di inizio e fine

Nonostante per queste applicazioni la ricerca della soluzione sia stata interrotta prima di raggiungere soluzioni ottimali, dal confronto dei due grafici in Figura 11 si può notare come l'algoritmo non migliora la soluzione in prossimità dei valori di temperature estremi. A temperature elevate corrisponde un'alta probabilità di scegliere soluzioni peggiori; in questo modo, l'algoritmo esamina un numero di soluzioni molto elevato, seguendo una strategia di ricerca della soluzione poco efficiente. A temperature basse, invece, la probabilità di scegliere una soluzione peggiore diventa così bassa che l'algoritmo rimane bloccato in un minimo locale. Un numero eccessivo di iterazioni a basse temperature risulta essere poco efficiente: a questo punto della procedura si presume che la soluzione sia già prossima a quella ottimale e che l'intorno della soluzione sia già stato sufficientemente esplorato. Questo fenomeno è indipendente dalla scelta del numero di iterazioni interne o esterne, per cui a conclusione della analisi di sensibilità, sono stati individuati i seguenti parametri ottimali:

- $T_0 = 10^2$
- $T_{\text{end}} = 10^{-2}$

Dopo aver scelto le temperature di inizio e fine ottimizzazione, l'analisi è stata indirizzata a determinare il numero di iterazioni interne per ciascun valore di temperatura e il grado di raffreddamento q , che, avendo fissato i valori estremi di temperatura, definisce univocamente il numero di iterazioni esterne. La Tabella 11 seguente mostra i diversi risultati relativi alla stessa applicazione variando il numero di soluzioni analizzate, aumentando progressivamente sia il grado di raffreddamento che le iterazioni interne L .

Tabella 11: Risultati ottimizzazione al variare dei parametri dell’algoritmo e del tempo di elaborazione

L	q	Soluzioni esaminate	CPU time (min)	Min dist (km)	Veicoli necessari	Dist/veh (km)	Fattore di carico	Numero di ricariche
100	0.90	88*100	4	580	11	52.9	41%	2
200	0.95	180*200	5	474	9	52.6	51%	2
500	0.98	454*500	11	347	7	49.5	65%	1
1000	0.99	917*1000	32	296	6	49.3	76%	1
2000	0.995	1838*2000	118	271	6	45.2	76%	1

Si può osservare dai valori riportati in tabella che per ottenere valori di fattore di carico maggiori del 75% sono state esaminate 917.000 soluzioni, per un tempo di elaborazione superiore ai 20 minuti. Aumentando ulteriormente i parametri l’algoritmo comunque non ha trovato una soluzione migliore in termini di veicoli e di fattore di carico, ottenendo solo una leggera diminuzione del tragitto percorso dai veicoli. Si nota che all’aumentare del numero di iterazioni interne e esterne è diminuito il numero di veicoli necessari a completare le consegne, e sono diminuiti notevolmente anche i km percorsi complessivamente dai veicoli. Poiché il volume delle consegne è sempre costante, il fattore di carico risulta inversamente proporzionale al numero dei veicoli. Decresce anche il numero di ricariche intermedie da effettuare che incidono significativamente sulla qualità della soluzione.

5 Conclusioni e sviluppi futuri

Il *software* è stato testato su un caso di test al fine di individuare i punti di forza e di debolezza della procedura, sia in termini strategici o tattici, riguardanti le ipotesi di organizzazione del sistema logistico, sia in termini di risoluzione numerica del problema. Il modulo di ottimizzazione è stato applicato e valutato sul caso realistico di Roma, con diverse applicazioni di flotta e consegne, al fine di verificarne il corretto funzionamento logico ed informatico. L’algoritmo è stato dapprima utilizzato ad indicare la convenienza della locazione del deposito in funzione della distribuzione spaziale del sistema di attività della città, paragonando le diverse zone di Roma. In seguito è stata scelta una specifica categoria merceologica, nello specifico l’insieme delle librerie, per portare avanti l’analisi di sensitività sui parametri dell’algoritmo di Simulated Annealing. Sono stati trovati i parametri ottimali considerando anche i tempi di elaborazione. È stato inoltre testato il recovery, simulando un’anomalia per uno dei veicoli: il software ne ha quindi calcolato la posizione ed ha eseguito una nuova ottimizzazione il veicolo in questione, inserendo una ricarica intermedia e verificando i vincoli di tempo e di autonomia.

6 Riferimenti bibliografici

- [1] G. Fusco, "Studio per la mobilità delle merci nel Centro storico di Roma." Società Trasporti Automobilistici di Roma, 2000.
- [2] G. Fusco, A. Alessandrini, C. Colombaroni, and M. P. Valentini, "A Model for Transit Design with Choice of Electric Charging System," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, 2013.

7 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.

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.

Natalia Isaenko è un'assegnista di ricerca con particolare attenzione alla modellazione e pianificazione dei trasporti. Ha conseguito la laurea magistrale in Ingegneria dei

trasporti (2014) presso l'Università La Sapienza di Roma ed è stata insignita del premio "Excellent Graduate Student" per gli eccezionali risultati accademici. Dopo la laurea è entrata a far parte del Dipartimento dei Trasporti dell'Università di Roma "La Sapienza" come borsista nell'ambito di un progetto multidisciplinare riguardante l'applicazione dell'analisi del traffico online e dei metodi per la previsione del traffico. Ha completato la sua tesi di dottorato "Metodi spaziotemporali per previsioni di traffico a breve termine" in Infrastrutture e Trasporti nel 2019 presso l'Università La Sapienza di Roma dove è tutor didattico per studenti stranieri. Durante il suo dottorato di ricerca è stata coinvolta in diversi progetti di ricerca, relativi alla modellazione del traffico, alla previsione del traffico e alla calibrazione dei modelli di domanda di mobilità.