



Ricerca di Sistema elettrico

Applicazione del nuovo framework modellistico per il controllo del traffico a reti test e validazione del modello

S. de Luca, R. Di Pace, C. Fiori, F. Storani

APPLICAZIONE DEL NUOVO FRAMEWORK MODELLISTICO PER IL CONTROLLO DEL TRAFFICO A RETI TEST E VALIDAZIONE DEL MODELLO

S. de Luca, R. Di Pace, C. Fiori, F. Storani
(Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: Tecnologie

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

Work package: Mobilità

Linea di attività: Applicazione del nuovo framework modellistico per il controllo del traffico a reti di test e validazione del modello (LA 2.28)

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 "Innovazioni tecnologiche e modellistiche per la mobilità elettrica urbana" Macro attività 3 (LA2.28)

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Gaetano Valenti

Responsabile scientifico Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno: prof. Stefano de Luca

Indice

SOMMARIO.....	4
1 MOTIVAZIONI E SINTESI DELLE ATTIVITÀ.....	5
2 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO.....	9
2.1 CARATTERIZZAZIONE DELLA RETE	9
2.2 DATI DI INPUT.....	10
3 PROGETTAZIONE SEMAFORICA: MONOBIETTIVO VS MULTI-OBIETTIVO	12
3.1 PROGETTAZIONE SEMAFORICA: MONOBIETTIVO VS MULTI-OBIETTIVO (LIVELLO DI DOMANDA BASSO)	12
3.2 PROGETTAZIONE SEMAFORICA: MONOBIETTIVO VS MULTI-OBIETTIVO (LIVELLO DI DOMANDA ELEVATO)	16
4 OTTIMIZZAZIONE BI-LIVELLO SEMAFORICA: PROGETTAZIONE SEMAFORICA ED OTTIMIZZAZIONE DELLA VELOCITÀ 18	
5 CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE	19
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	21
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	27
7 APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	28

Sommario

Il presente documento riporta la descrizione delle attività svolte dal Gruppo Trasporti del Dipartimento di Ingegneria Civile (DICIV) dell'Università degli Studi di Salerno, nel secondo anno (annualità 2021) relativo all'accordo Accordo di Collaborazione con ENEA che fa parte del Piano Triennale di Realizzazione (PTR) 2019-2021 del progetto Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali.

L'Obiettivo generale del progetto proposto dal Gruppo Trasporti dell'Università di Salerno è lo sviluppo e la implementazione di strategie di controllo del traffico per flussi veicolari composti da veicoli elettrici, connessi ed autonomi; alla base del funzionamento delle strategie di controllo vi sono obiettivi di ottimizzazione delle prestazioni della rete quali ad esempio la riduzione dei tempi di viaggio e degli impatti quali ad esempio i consumi. Per quanto concerne questi ultimi essi possono essere perseguiti utilizzando uno specifico modello per la stima dei consumi dei veicoli elettrici.

Nella prima annualità sono state svolte le seguenti attività:

1. Analisi di letteratura e identificazione delle migliori soluzioni adottate per:
 - a. modelli per la progettazione delle intersezioni semaforizzate sia mediante approccio statico (fuori linea) che mediante approccio dinamico ossia in tempo reale (in linea)
 - b. modelli per la stima del consumo microscopico dei veicoli elettrici
2. Sviluppo di un framework modellistico integrato per il controllo del traffico sia fuori linea che in linea (in tempo reale) in presenza di flotte di veicoli elettrici ed autonomi e per la stima dei consumi energetici

Per quanto concerne la seconda annualità, oggetto del presente report, essa focalizza sulla applicazione dei modelli precedentemente sviluppati in riferimento ad uno specifico caso studio.

Il documento è strutturato come segue.

Nel paragrafo 1, riprendendo alcuni concetti già introdotti nella precedente annualità, vengono reinquadrate ed approfondite la introduzione e sintesi delle attività questa volta dando maggiore enfasi alla strategia di controllo sviluppata; nel paragrafo 2 vengono invece presentati la rete di riferimento usata per tutte le applicazioni ed i dati di input adottati. Le prime applicazioni che riguardano il confronto fra la strategia monobiettivo (in cui la ottimizzazione si basa su un unico criterio) e quella multi-obiettivo (in cui la ottimizzazione si basa su più criteri contemporaneamente) vengono presentate nel paragrafo 3, mentre il paragrafo 4 focalizza sulla strategia bi-livello che integra la progettazione semaforica monobiettivo al primo livello con la ottimizzazione della velocità al livello inferiore. Infine, il paragrafo 5 discute le conclusioni e le prospettive future del framework sviluppato.

1 Motivazioni e sintesi delle attività

Per quanto il futuro dei sistemi di trasporto sarà connesso ed elettrico, esso continuerà tuttavia a basarsi su automobili e infrastrutture fisiche. In questo quadro, la sfida dei prossimi anni sarà quella di sviluppare strategie che armonizzino conducenti, tecnologie ed infrastrutture per ottimizzare il livello di servizio e di efficienza energetica (cioè consumi ed emissioni) dell'intero sistema di trasporto.

La letteratura è ricca di contributi che tentano di affrontare tali questioni a diverse scale. Grande attenzione è stata infatti riservata ai livelli extraurbani e urbani e, in particolare, nel secondo caso alle intersezioni isolate (ossia alle singole intersezioni semaforizzate) e interagenti (ossia alle arterie ed alle reti magliate più o meno complesse di intersezioni semaforizzate).

Ad oggi, diversi studi hanno dimostrato che strategie potenziate basate sul controllo connesso e l'automazione ed integrate opportunamente con il controllo della velocità dei veicoli, possono incrementare significativamente le prestazioni della rete (ad es. tempo totale impiegato, tempo di viaggio, tempo di ritardo, ecc.) rispetto alle reti in cui si considerano veicoli guidati da solo conducenti umani (Fajardo et al., 2011; Liebner et al., 2012; Feng et al., 2015). Inoltre, queste strategie incidono anche sui consumi energetici e sulle emissioni; per questo motivo una corretta ottimizzazione dei semafori alle intersezioni può portare a significativi benefici energetici ed ambientali.

I benefici attesi dipendono dai contesti tecnologici (connettività, cooperazione, automazione e powertrain innovativi) e dalle variabili controllabili (Levin e Boyles 2016a; Zhou et al. 2017; Zhu e Ukkusuri 2017, 2018). In particolare, per diversi contesti tecnologici, i diversi livelli/tipi di connettività, automazione e powertrain possono incidere significativamente sull'impatto delle strategie di controllo adottate e, quindi, sui potenziali benefici ottenibili.

La sfida principale è progettare correttamente le strategie di controllo in presenza di veicoli connessi ed elettrici (connected vehicles, CV; electric vehicles, EV). Tuttavia, la progettazione di strategie di controllo in presenza di CV può basarsi sui risultati della ricerca esistente (Stevanovic et al., 2009; Priemer e Friedrich, 2009; He et al., 2015; Goodall et al., 2013; Lee et al., 2013; Feng et al., 2015, 2016; Al Islam and Hajbabaie, 2017; Beak et al., 2017; Wang et al., 2015; 2016; Han et al., 2021), al contrario, la progettazione in presenza di veicoli elettrici rimane ancora una prospettiva di ricerca.

I veicoli elettrici, infatti, sono caratterizzati da una maggiore efficienza e da una conseguente riduzione dei consumi energetici. D'altra parte, a differenza dei veicoli con motore a combustione interna (ICEV), la minimizzazione del tempo totale trascorso (TTS) non garantisce un consumo energetico minimo per i veicoli elettrici. Infatti, i veicoli elettrici sono caratterizzati da una relazione diretta tra la congestione (cioè il tempo di percorrenza effettivo) e il consumo di energia evidenziando un incremento di energia al variare in termini di incremento della velocità media del traffico (Fiori et al., 2019).

Per questo sono necessarie strategie specifiche coerenti con la funzione di consumo dei veicoli elettrici.

A tal fine, dovrebbe essere perseguito un quadro di ottimizzazione multi-obiettivo, che includa il controllo del traffico, il flusso del traffico e la modellazione del consumo energetico dei veicoli elettrici.

Ad oggi, ciascuna delle questioni sopra menzionate è stata studiata in letteratura. Diversi studi hanno focalizzato sulle strategie di ottimizzazione della velocità dei veicoli solo attraverso strategie di guida maggiormente compatibili con l'impatto ambientale (eco-driving), come ad esempio algoritmi a velocità variabile per il traffico lungo le arterie comunemente noti come sistema Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) (Katsaros et al., 2011). Altri studi si sono concentrati sullo sviluppo di strategie di controllo del consumo di carburante per un singolo veicolo senza considerare l'impatto su altri veicoli (HomChaudhuri et al., 2017; Zhou et al., 2017 e Ma et al., 2017) mentre pochi studi hanno tentato di ottimizzare il consumo in riferimento a platon di veicoli (Zhao et al., 2015).

Tuttavia, pochissimi studi hanno studiato l'uso dei segnali semaforici per il consumo e la riduzione delle emissioni (Stevanovic et al., 2009; Zhao et al., 2021; Zegeye et al., 2009; Zegeye et al., 2013). In particolare, Stevanovic et al. (2009) hanno proposto un framework integrato per l'ottimizzazione dei tempi semaforici combinando il consumo e la riduzione delle emissioni, mentre Zegeye et al. (2009) hanno progettato una strategia di controllo dinamica basata su model predictive control (MPC) incentrata sul controllo sia del tempo di viaggio totale che delle emissioni totali. Zegeye et al., (2013) hanno proposto un framework che combina modelli macroscopici di flusso di traffico e modelli microscopici di emissione e consumo di carburante per le reti di traffico autostradale. A livello urbano, Zhu et al., (2013) hanno adottato un approccio simile volto a ridurre al minimo i ritardi e le emissioni.

Infine, pochissimi studi hanno preso in considerazione la presenza di veicoli elettrici; ad esempio, Li e Ban (2018) hanno sviluppato un framework adatto al coordinamento di più segnali in presenza di veicoli connessi e automatizzati (CAV), e le funzioni obiettivo considerate erano il consumo di energia e il tempo di viaggio. In generale, gli studi su questo argomento adottano modelli con alcune limitazioni per la valutazione del consumo di energia dei veicoli elettrici. Ad esempio, Luo et al. miravano a sviluppare una nuova strategia di ottimizzazione delle velocità per le intersezioni successive nel caso di veicoli ibridi (Luo et al., 2017). Per il modello di consumo energetico, hanno adottato mappe di consumo di carburante/energia che possono essere generate esclusivamente testando un veicolo su un banco dinamometrico motore o telaio. Pertanto, esistono limitazioni critiche all'adattabilità (trasferibilità operativa/scalabilità) di questi modelli, come riportato da alcuni studi (Fiori et al., 2018; Park et al., 2013).

Questo studio propone un framework modellistico per la ottimizzazione multi-obiettivo basato sulla minimizzazione del TTS e del consumo di energia (EC) dei veicoli elettrici. Per raggiungere questo obiettivo, come già ampiamente discusso nel dettaglio nel report relativo alla prima annualità, vengono considerati tre modelli:

1. un modello di controllo del traffico che mira al progetto dei piani di semaforizzazione
2. un modello di flusso di traffico per la stima di TTS come indicatore delle prestazioni della rete
3. un modello per la stima dei consumi dei veicoli elettrici alle intersezioni.

Più in dettaglio, il framework consente la gestione del traffico a livello di rete e focalizza sull'ottimizzazione cooperativa del consumo energetico dei veicoli elettrici. Questo è illustrato nella Figura 1.

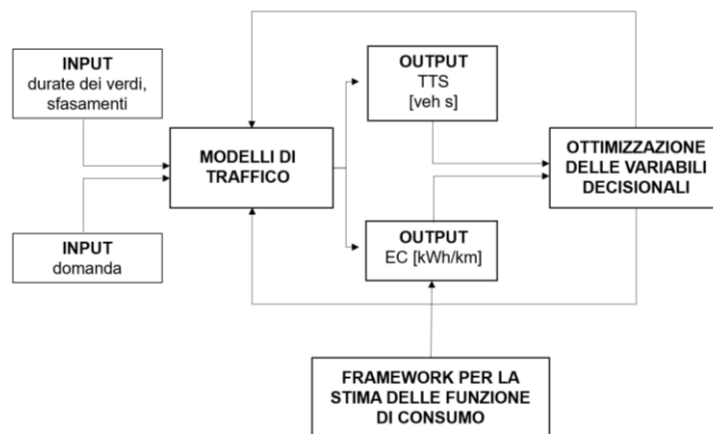


Figure 1. Quadro di sintesi del framework modellistico

L'obiettivo generale del progetto proposto dal Gruppo Trasporti dell'Università di Salerno è lo sviluppo di strategie di controllo del traffico per flussi veicolari composti da veicoli elettrici ed autonomi, utilizzando un affidabile modello per la stima dei consumi dei veicoli elettrici. L'obiettivo è in linea con quello della Ricerca di Sistema (RdS) che, come noto, è un'attività di ricerca e sviluppo finalizzata all'innovazione tecnica e tecnologica di interesse generale per il settore elettrico che ha come obiettivo il miglioramento dell'economicità, della sicurezza e della compatibilità ambientale, al fine di assicurare al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Differentemente dalla prima annualità, in questa seconda annualità (LA2.28. Applicazione del nuovo framework modellistico per il controllo del traffico a reti di test e validazione del modello) l'obiettivo centrale è stato quello di applicare i modelli specificati e calibrati nel dettaglio nel corso della precedente annualità, ad un caso studio. Per quanto concerne quest'ultimo, per quanto non sia stato considerato un caso studio reale, di fatto è stato considerato un caso studio teorico che consentisse di evidenziare tutte le potenzialità del framework sviluppato con specifico riferimento allo studio ed alla modellazione dei fenomeni caratterizzanti le reti di intersezioni. Questi ultimi riguardano l'incidenza della dispersione delle velocità, della propagazione delle code e della dispersione delle stesse sul calcolo delle variabili di controllo dei piani di semaforizzazione. In tal senso, è opportuno evidenziare che le reti di intersezioni costituiscono un caso studio particolarmente significativo e complesso dato l'effetto di interazione che si genera fra intersezioni successive/adiacenti; in particolare, per effetto della propagazione del flusso dalla intersezione di monte a quella di valle, e date alcune distanze non particolarmente elevate, si osserva che il flusso a monte può avere un effetto sul ritardo della intersezione di valle. In tal senso, la interazione va opportunamente rappresentata in forma implicita tenendo conto della modellazione del flusso veicolare.

In maggiore dettaglio, il framework di ottimizzazione è stato implementato su una rete a nove nodi in cui, una volta che i veicoli si avvicinano alla zona di controllo, si presume siano connessi e le informazioni possono essere scambiate tra ciascun veicolo ed il controllore. Inoltre, come evidenziato nella figura (vedi Figura 2) in un'ottica di contesto applicativo del tipo V2X, la zona di controllo è identificata come la regione centrata su ogni incrocio controllato mediante impianto semaforico; i veicoli all'interno della zona di controllo sono connessi (mediante opportuni protocolli di comunicazione) con l'infrastruttura stessa ossia possono scambiare in ingresso-uscita informazioni con essa.

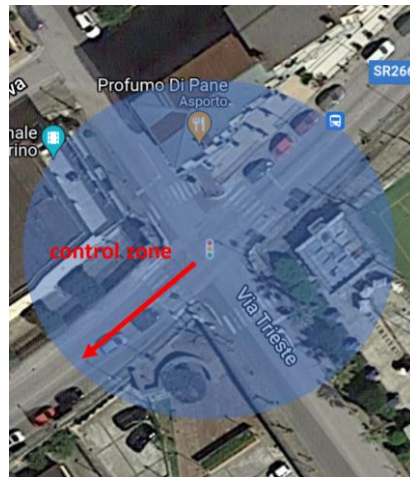


Figure 2: Schema della zona di controllo e dell'area di comunicazione veicolo - infrastruttura

Inoltre, viene effettuato all'interno dello studio, un confronto tra la strategia di controllo multi-obiettivo proposta e la strategia mista (che combina il controllo del traffico e l'ottimizzazione della velocità). Infine, tenendo presente che i CV aumenteranno ma nel breve periodo si prevede che le condizioni di flusso del traffico saranno miste, si è ritenuto opportuno considerare la presenza veicoli guidati da conducente umano (Levin e Boyles 2016a, 2016b), e dunque analizzare diversi tassi di penetrazione dei CV.

2 Descrizione del caso studio

2.1 Caratterizzazione della rete

Questa sezione mostra i risultati di due applicazioni numeriche: l'ottimizzazione dei piani semaforici e una procedura a due livelli che integra la ottimizzazione del piano di semaforizzazione con l'ottimizzazione della velocità.

Prima di entrare nel dettaglio della descrizione della rete, è opportuno premettere che il layout scelto è stato orientato a fare emergere la interazione fra intersezioni successive non soltanto sulla arteria ma anche su un sistema magliato in cui l'impatto del fenomeno di dispersione delle velocità dei veicoli nel passaggio da una intersezione alla successiva è particolarmente significativo. Sarebbe plausibile sperimentare sistemi magliati più complessi, ma di fatto questo aspetto andrebbe investigato non tanto per fare emergere la efficacia e la efficienza delle strategie di controllo del traffico proposto, quanto la loro combinazione con il caricamento della rete ed in particolare con l'approccio implicito nella rappresentazione della scelta del percorso. In questa ricerca, differentemente, è stato adottato un approccio esplicito (enumerativo) dei percorsi, pertanto, il fenomeno di caricamento della rete non è stato investigato e potrebbe essere oggetto di studi futuri (vedi prospettive future).

La rete utilizzata per ottenere i risultati è costituita da cinque intersezioni interagenti connesse tra loro con collegamenti a corsia unica di 810 metri in entrambe le direzioni, per un totale di dieci connessioni interne. Vi sono, inoltre, cinque nodi di origine e cinque nodi di destinazione collegati alla rete, utilizzando cinque connessioni esterne di 300 metri e altre cinque connessioni esterne di 90 metri rispettivamente per i collegamenti in ingresso e per quelli in uscita. La seguente Figura 3 mostra lo schema del layout di rete. Ogni intersezione semaforizzata, coerentemente con l temporizzazione canonica dei piani, ha tre approcci (accessi) con verde in una sola fase e un periodo di "tutto rosso" tra le fasi della durata di circa 3 secondi, infine, la durata del ciclo di 90 secondi è uguale per tutti gli incroci.

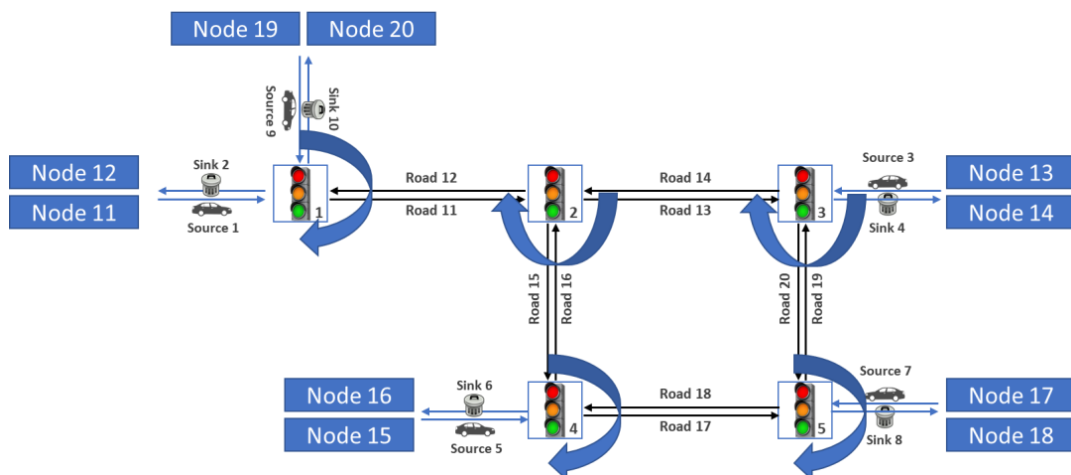


Figure 3: Rete test a 5 nodi

2.2 Dati di input

Per quanto riguarda la domanda entrata-uscita, la seguente tabella mostra i flussi delle coppie origine-destinazione considerate.

Tabella 1. Matrice ingresso/uscita

		Uscita [PCU/h]					TOT
		12	14	16	18	20	
Ingressi [PCU/h]	11	0	10	10	10	0	30
	13	10	0	2	2	10	24
	15	10	2	0	2	10	24
	17	10	2	2	0	10	24
	19	0	10	10	10	0	30
TOT		30	24	24	24	30	132

È opportuno precisare, che in questa fase si sta operando con un approccio enumerativo dei percorsi. A tal fine il comportamento di scelta del percorso è stato modellato considerando due percorsi per ciascuna coppia o-d (approccio selettivo alla specificazione della scelta del percorso) e un modello di scelta logit. Si assume che l'utilità percepita di ciascun percorso dall'origine, o, a qualsiasi destinazione, d, sia distribuita con una varianza pari al 20% dei costi medi minimi del percorso su tutte le destinazioni. Il riepilogo della applicazione di tali modelli è mostrato di seguito (Tabella 2).

Tabella 2. Flussi di percorso

Origine	Destinazione	ID Percorso	Nodi del percorso	Probabilità	Numero veicoli ora	Numero veicoli in simulazione	
11	14	1	{ 1 11 13 4 - - }	0.9	9	11	
		2	{ 1 11 15 17 19 4 }	0.1	1	1	
	16	1	{ 1 11 13 20 18 6 }	0.1	1	1	
		2	{ 1 11 15 6 - - }	0.9	9	11	
	18	1	{ 1 11 13 20 8 - }	0.5	5	6	
		2	{ 1 11 15 17 8 - }	0.5	5	6	
	20	1	{ 1 10 - - - - }	0.5	0	0	
		2	{ 1 10 - - - - }	0.5	0	0	
	13	12	1	{ 3 14 12 2 - - }	0.9	9	11
			2	{ 3 20 18 16 12 2 }	0.1	1	1
16		1	{ 3 14 15 6 - - }	0.5	1	1	
		2	{ 3 20 18 6 - - }	0.5	1	1	
18		1	{ 3 14 15 17 8 - }	0.1	0	0	
		2	{ 3 20 8 - - - }	0.9	2	2	
20		1	{ 3 14 12 10 - - }	0.9	9	11	
		2	{ 3 20 18 16 12 10 }	0.1	1	1	
15		12	1	{ 5 16 12 2 - - }	0.1	1	1
			2	{ 5 17 19 14 12 2 }	0.9	9	11
	14	1	{ 5 16 13 4 - - }	0.5	1	1	
		2	{ 5 17 19 4 - - }	0.5	1	1	
	18	1	{ 5 16 13 20 8 - }	0.9	2	2	
		2	{ 5 17 8 - - - }	0.1	0	0	
	20	1	{ 5 16 12 10 - - }	0.9	9	11	
		2	{ 5 17 19 14 12 10 }	0.1	1	1	
	17	12	1	{ 7 19 14 12 2 - }	0.5	5	6
			2	{ 7 18 16 12 2 - }	0.5	5	6
14		1	{ 7 19 4 - - - }	0.9	2	2	
		2	{ 7 18 16 13 4 - }	0.1	0	0	

16	1	{ 7 19 14 15 6 - }	0.1	0	0
	2	{ 7 18 6 - }	0.9	2	2
20	1	{ 7 19 14 12 10 - }	0.5	5	6
	2	{ 7 18 16 12 10 - }	0.5	5	6
12	1	{ 9 2 - }	0.5	0	0
	2	{ 9 2 - }	0.5	0	0
14	1	{ 9 11 13 4 - }	0.9	9	11
	2	{ 9 11 15 17 19 4 }	0.1	1	1
16	1	{ 9 11 13 20 18 6 }	0.1	1	1
	2	{ 9 11 15 6 - }	0.9	9	11
18	1	{ 9 11 13 20 8 - }	0.5	5	6
	2	{ 9 11 15 17 8 - }	0.5	5	6

La seguente Tabella 3 mostra le principali impostazioni dei parametri del modello di flusso di traffico. L'orizzonte di simulazione è pari a 4500s, con un periodo di inizializzazione antecedente alla simulazione vera e propria di 900s.

Tabella 3. Parametri del modello

Parametro	CTM	CA
Δt time step		1 s
k_{jam} densità di saturazione		200 veh/km
Cell lunghezza	22.50 m	2.50 m
Vehicle lunghezza	-	2 cells
v_f velocità di flusso	22.50 m/s	9 cells/s
w velocità dell'onda shock	5 m/s	-
q_i massimo flusso	2000 veh/h	-
p probabilità di dawdling	-	0.266
valore minimo di velocità cui viene applicata la dawdling	-	2 cells/s

Le due applicazioni considerate sono state effettuate per ottimizzare:

- semafori con approccio monobiettivo e multiobiettivo,
- semafori e velocità su una procedura iterativa a due livelli

Gli indicatori per analizzare i risultati delle applicazioni sono definiti come:

- Tempo totale di viaggio (TTS): la somma del numero di veicoli su ciascun arco di collegamento per ogni fase temporale durante l'intervallo di simulazione, ottenendo un valore univoco per l'intera rete.
- Ritardo totale (TD): il tempo extra trascorso da ciascun veicolo su un arco di collegamento a causa della congestione o della presenza di semafori, ottenuto come il tempo totale trascorso da ciascun veicolo su ciascun arco di collegamento cui viene sottratto il tempo impiegato per attraversare l'arco collegamento in condizioni di deflusso libero senza semafori.
- Consumo EV e consumo ICEV: somma dei consumi di ciascun veicolo in ciascun arco di collegamento della rete considerandoli tutti come EV o ICEV, ottenuti dal tempo di percorrenza di ciascun arco di collegamento e applicando la rispettiva legge energetica.

3 Progettazione semaforica: monobiettivo vs multi-obiettivo

Per quanto concerne l'ottimizzazione dei piani di semaforizzazione, l'obiettivo è confrontare l'ottimizzazione monobiettivo con l'ottimizzazione multi-obiettivo, riducendo al minimo il tempo totale di viaggio e il consumo totale stimati facendo riferimento a tutti i veicoli della rete (come ICEV ed EV).

Le analisi sono state condotte in riferimento a due scenari di domanda, ossia uno è quello già precedentemente illustrato nel quale si considera un livello di domanda base (*livello basso*) l'altro che verrà di seguito presentato, focalizza su valori di domanda più elevati (*livello elevato*) tali da 'stimolare' fenomeni di congestione e rigurgiti di code.

3.1 Progettazione semaforica: monobiettivo vs multi-obiettivo (livello di domanda basso)

In riferimento allo scenario relativo al livello di domanda base, i risultati sono riportati nella Tabella 4, che mostra i valori degli indicatori per ciascuna procedura di ottimizzazione con riferimento all'intera rete, mentre la Tabella 6 mostra i valori medi dei consumi specifici per i veicoli in rete non solo con riferimento all'intera rete ma anche nello specifico per gli archi di connessione più interni della rete (che rappresentano gli archi principali della rete) e quelle più esterne (che riguardano gli ingressi e le uscite nelle/dalla rete) ¹

Tabella 4. Sintesi dei risultati

Funzione obiettivo	Total Time Spent [veh s]	Consumo EV [kWh]	Consumo ICEV [l]	TD [s]	Valore della funzione obiettivo
Min TTS	19810	32.71	23.17	4380	19810.00
Min consumo (somma) EV	28405	28.93	27.40	11786	28.93
Min multiobiettivo	22572	29.91	24.91	6341	0.41

Tabella 5. Valori medi del consumo specifico per EV e ICEV

Funzione obiettivo	Consumo medio EV [kWh/km]			Consumo medio ICEV [l/100km]		
	Archi esterni	Archi interni	Rete completa	Archi esterni	Archi interni	Rete completa
Min TTS	0.109	0.101	0.105	0.080	0.070	0.074
Min consumo (somma) EV	0.097	0.088	0.092	0.091	0.084	0.087
Min multiobiettivo	0.100	0.092	0.095	0.085	0.076	0.078

*Valore medio del consumo rispetto agli archi ed ai veicoli

È possibile inoltre evidenziare dai risultati ottenuti che i veicoli a combustione interna ed i veicoli elettrici esibiscono comportamenti differenti: per un'ottimizzazione monobiettivo basata sul TTS (total time spent, tempo totale di viaggio), il valore minimo di consumo viene raggiunto anche per i veicoli a combustione interna, mentre non avviene lo stesso per i veicoli elettrici; in questo senso, l'ottimizzazione multiobiettivo può essere considerata solo con il consumo di veicoli elettrici. Inoltre, utilizzando nel caso degli EV l'ottimizzazione multi-obiettivo (rispettivamente basata sulla minimizzazione del TTS e del consumo) in termini di confronto, si evidenzia che gli indicatori peggiorano ad ogni ottimizzazione monobiettivo di circa il 12% per il TTS ed il 3% per il consumo. Confrontando i risultati delle ottimizzazioni monobiettivo, quando si minimizza il TTS, il valore del

¹ Archi di collegamento esterni: (1-3-5-7-9) dalle immissioni alla rete e (2-4-6-8-10) dalla rete agli archi uscenti. Archi di collegamento interni: (da 11 a 20) che connettono i nodi della rete.

consumo di EV è di circa il 12% superiore al suo valore minimo. Inoltre, quando si riduce al minimo il consumo di EV, il valore del TTS è quasi del 30% superiore al valore minimo trovato. Confrontando il valore del tempo di attesa dell'indicatore di prestazione con il suo valore minimo, esso è circa il 63% più alto per la minimizzazione del consumo di veicoli elettrici mentre è del 32% più alto per l'ottimizzazione multi-obiettivo.

È opportuno, inoltre, effettuare alcune precisazioni in merito al confronto fra ICEV e EV. In particolare, in riferimento alle caratteristiche del modello di traffico considerato, la massima velocità è pari a 22.5 m/s (81 km/h); questo parametro è stato settato in maniera tale da essere coerente con il realismo di uno scenario urbano. Pertanto, il TTS si minimizza quando la velocità media si avvicina al valore di velocità massima di 81 km/h.

In riferimento all'ICEV ed alla relativa funzione di consumo (Fiori et al., 2019), dalla rappresentazione sperimentale si evince che il valore minimo si realizza in prossimità della velocità pari a 103 km/h (vedi figura di seguito). Per tale ragione il valore di consumo raggiunto nel caso della nostra simulazione è una soluzione sub-ottima ammissibile coerentemente con il vincolo di massima velocità introdotto nel modello.

In sintesi, nel caso mono - criterion la ottimizzazione del TTS consente di raggiungere il minimo valore di consumo nel caso specifico dell'ICEV e chiaramente questo non costituisce un caso generale.

Infine, la traiettoria della funzione di consumo dell'EV al variare della velocità, raggiunge il suo valore minimo in corrispondenza dei 50 km/h (vedi figura sotto). Pertanto, questo risultato evidenzia che la minimizzazione del TTS fornisce valori di consumo più alti nel caso dell'EV di quelli che sarebbe possibile ottenere effettuando la minimizzazione diretta sulla curva di consumo.

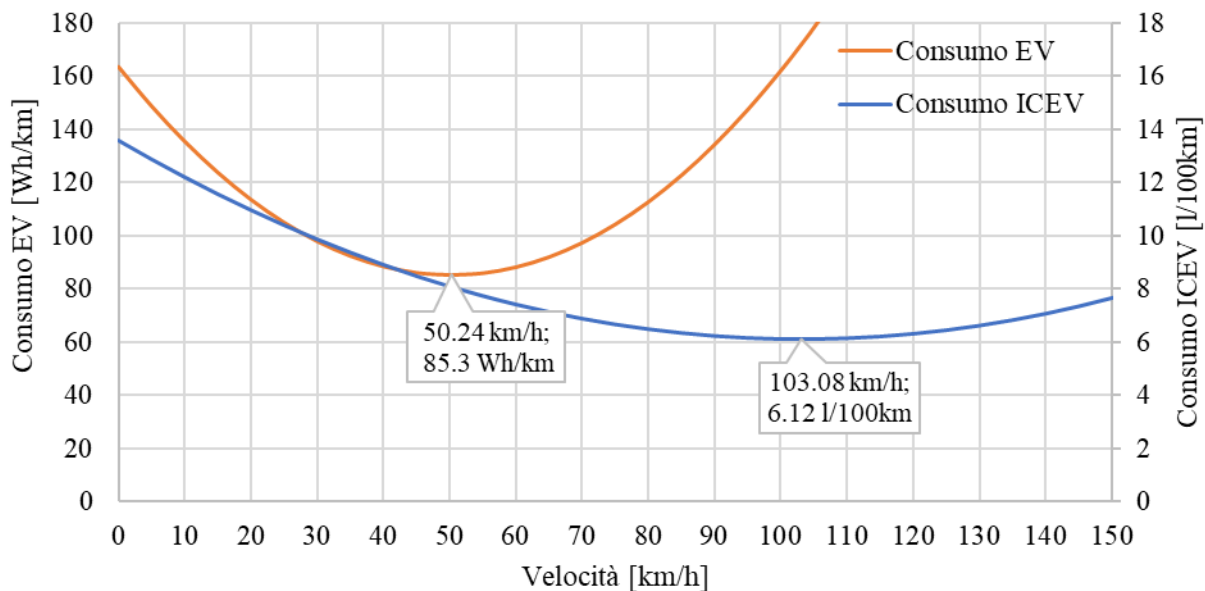


Figure 4: Funzione di consumo dell'EV/ICEV al variare della velocità

Inoltre, per evidenziare l'efficacia della procedura di ottimizzazione, la seguente Figura 5a mostra l'andamento della funzione obiettivo considerata nell'ottimizzazione multi-obiettivo (confronto tra le traiettorie del valore medio e dei valori migliori) rispetto al numero di iterazioni. La Figura 5b mostra il consumo di EV rispetto al TTS per alcune iterazioni, con i suoi valori normalizzati rispetto ai valori minimi e massimi raggiunti durante la procedura di ottimizzazione. La prima Figura evidenzia una convergenza asintotica raggiunta intorno all'iterazione 750, confermata anche dalla

Figura 5b; più in dettaglio, è possibile osservare che la procedura converge alla soluzione ottima intorno all'iterazione 1500.

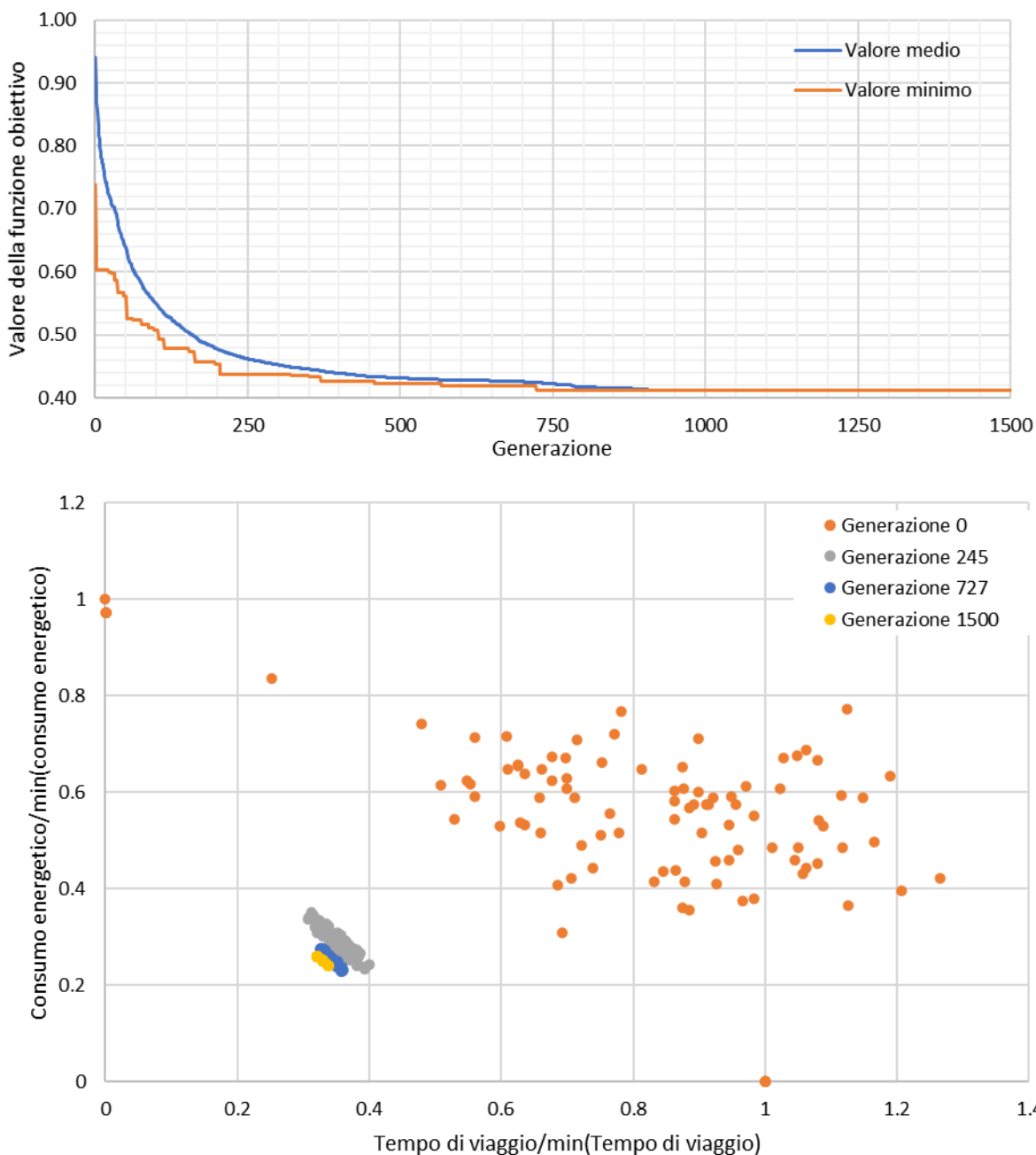


Figure 5: a) funzione obiettivo al variare del numero di iterazioni b) funzione di consumo al variare del tempo di viaggio

Nella Figura 6 è mostrato l'andamento dell'indicatore del consumo energetico totale di tutti i veicoli rispetto alla distanza totale percorsa ed alla lunghezza dell'arco di collegamento. Pertanto, un suo valore elevato può dipendere, per ogni arco, da un elevato numero di veicoli a basso valore di consumo e viceversa da un basso numero di veicoli ma con un valore di consumo più elevato. Per completezza, come già anticipato nella descrizione preliminare del caso studio, le lunghezze sono 300 metri per gli archi di collegamento 1-3-5-7-9, mentre sono 90 metri per gli archi di collegamento 2-4-6-8-10 ed infine 810 metri per gli archi di collegamento da 11 a 20.

Nella stessa figura, come ulteriore analisi, sono riportati il valore medio e la deviazione standard del consumo energetico, considerando le espressioni analitiche utilizzate per calcolare gli indicatori per il veicolo sull'arco di collegamento l. In questa analisi, le deviazioni standard del consumo totale sono basse, evidenziando che il modello di flusso di traffico è coerente con la formulazione adottata per la stima dei consumi. Data l'applicazione specifica del caso studio proposto e i vantaggi in termini computazionali, il modello di traffico adottato rappresenta la migliore soluzione per tale applicazione anche in combinazione con la correlazione polinomiale tra consumo energetico e velocità.

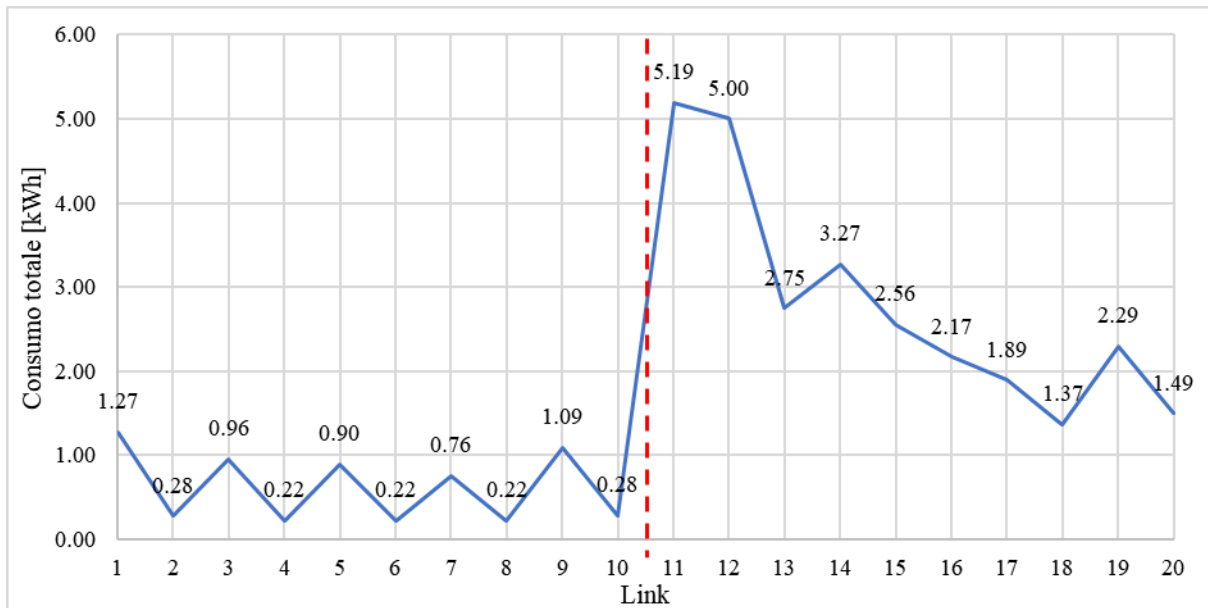


Figure 6: Consumo totale in funzione dell'identificativo dell'arco

Inoltre, in Figura 6, (in cui è riportato il consumo totale di energia mediato sul numero di veicoli rispetto alla lunghezza dell'arco di collegamento) è mostrato che il contributo principale nel calcolo dell'indicatore di consumo totale è dato dagli archi di collegamento 11, 12 e 14 poiché il numero di veicoli su questi archi è maggiore rispetto agli altri, ed in generale si ha un contributo minore da parte degli archi interni. Per quanto riguarda gli archi più esterni 1-3-5-7-9 che collegano le immissioni alla rete, essi hanno una lunghezza maggiore rispetto agli altri archi di collegamento esterni (300 m vs 90 m) e sono dotati di semafori alla fine con il conseguente effetto di incrementare il tempo di percorrenza di tali archi.

Infine, il contributo della velocità sull'indicatore di consumo è evidenziato attraverso la seguente Figura 7².

² E' opportuno evidenziare che nel caso dei veicoli a combustione interna, la minimizzazione del tempo totale di viaggio consente di raggiungere anche il minimo valore del consumo.

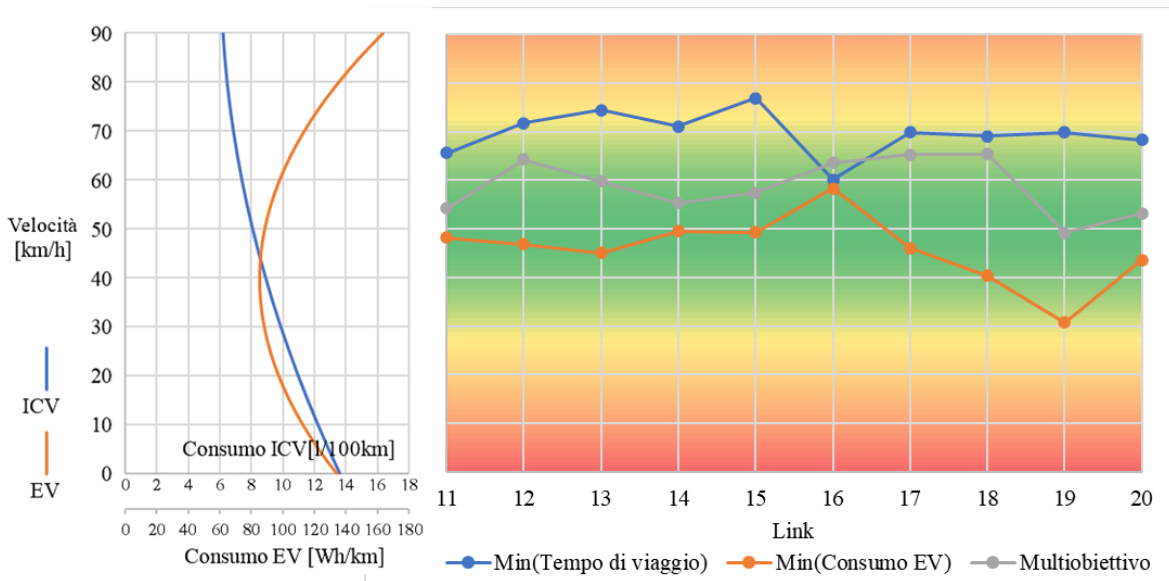


Figure 7: a) velocità in funzione del consumo dell'EV/ICEV; b) velocità in funzione dell'identificativo dell'arco

3.2 Progettazione semaforica: monobiettivo vs multi-obiettivo (livello di domanda elevato)

All'interno di questa sezione vengono discussi i risultati relativi all'applicazione tenendo conto di un livello di domanda elevato. Di seguito vengono riportati prima i dettagli relativi al setup sperimentale. Prima di tutto nella seguente tabella viene mostrata la matrice dei flussi di domanda.

Tabella 6. Matrice ingresso/uscita

		Uscita [PCU/h]					TOT
		12	14	16	18	20	
Ingressi [PCU/h]	11	0	100	50	50	0	200
	13	50	0	50	50	50	200
	15	50	20	0	20	50	140
	17	50	20	20	0	50	140
	19	0	50	50	50	0	150
TOT		150	190	170	170	150	830

Per quanto concerne invece la distribuzione dei flussi di percorso, essa viene mostrata di seguito nella seguente tabella.

Come nel caso precedente, l'applicazione numerica considerata è tesa a confrontare la strategia mono-obiettivo con quella multi-obiettivo, in un'ottica di minimizzazione del tempo totale di viaggio e del consumo totale di tutti i veicoli nella rete (sia che si tratti di veicoli a combustione interna che di veicoli elettrici).

Tabella 7. Flussi di percorso

Origine	Destinazione	Percorso ID	Nodi	Probabilità	Veic/h		N of vehicles per hour	
					Flusso Basso	Flusso elevato	N vehicles in simulation	N vehicles in simulation
11	14	1	{ 1 11 13 4 - - }	0.9	9	11	90	113
		2	{ 1 11 15 17 19 4 }	0.1	1	1	10	12
	16	1	{ 1 11 13 20 18 6 }	0.1	1	1	5	6
		2	{ 1 11 15 6 - - }	0.9	9	11	45	56
	18	1	{ 1 11 13 20 8 - }	0.5	5	6	25	31
		2	{ 1 11 15 17 8 - }	0.5	5	6	25	31
20	1	{ 1 10 - - - - }	0.5	0	0	0	0	
	2	{ 1 10 - - - - }	0.5	0	0	0	0	
13	12	1	{ 3 14 12 2 - - }	0.9	9	11	45	56
		2	{ 3 20 18 16 12 2 }	0.1	1	1	5	6
	16	1	{ 3 14 15 6 - - }	0.5	1	1	25	31
		2	{ 3 20 18 6 - - }	0.5	1	1	25	31
	18	1	{ 3 14 15 17 8 - }	0.1	0	0	5	6
		2	{ 3 20 8 - - - }	0.9	2	2	45	56
20	1	{ 3 14 12 10 - - }	0.9	9	11	45	56	
	2	{ 3 20 18 16 12 10 }	0.1	1	1	5	6	
15	12	1	{ 5 16 12 2 - - }	0.1	1	1	5	6
		2	{ 5 17 19 14 12 2 }	0.9	9	11	45	56
	14	1	{ 5 16 13 4 - - }	0.5	1	1	10	12
		2	{ 5 17 19 4 - - }	0.5	1	1	10	12
	18	1	{ 5 16 13 20 8 - }	0.9	2	2	18	23
		2	{ 5 17 8 - - - }	0.1	0	0	2	2
20	1	{ 5 16 12 10 - - }	0.9	9	11	45	56	
	2	{ 5 17 19 14 12 10 }	0.1	1	1	5	6	
17	12	1	{ 7 19 14 12 2 - }	0.5	5	6	25	31
		2	{ 7 18 16 12 2 - }	0.5	5	6	25	31
	14	1	{ 7 19 4 - - - }	0.9	2	2	18	23
		2	{ 7 18 16 13 4 - }	0.1	0	0	2	2
	16	1	{ 7 19 14 15 6 - }	0.1	0	0	2	2
		2	{ 7 18 6 - - - }	0.9	2	2	18	23
20	1	{ 7 19 14 12 10 - }	0.5	5	6	25	31	
	2	{ 7 18 16 12 10 - }	0.5	5	6	25	31	
19	12	1	{ 9 2 - - - - }	0.5	0	0	0	0
		2	{ 9 2 - - - - }	0.5	0	0	0	0
	14	1	{ 9 11 13 4 - - }	0.9	9	11	45	56
		2	{ 9 11 15 17 19 4 }	0.1	1	1	5	6
	16	1	{ 9 11 13 20 18 6 }	0.1	1	1	5	6
		2	{ 9 11 15 6 - - }	0.9	9	11	45	56
18	1	{ 9 11 13 20 8 - }	0.5	5	6	25	31	
	2	{ 9 11 15 17 8 - }	0.5	5	6	25	31	

I risultati sono mostrati di seguito ed in particolare i valori degli indicatori per ciascuna ottimizzazione evidenziano che, come nel caso precedente, prima di tutto ICEV e EV hanno comportamenti diversi; in maggiore dettaglio: nel caso della ottimizzazione mono-obiettivo basata sul minimo TTS, viene già raggiunto il minimo consumo per ICEV diversamente dall'EV per il quale ha dunque senso andare ad implementare la multicriteria.

Tabella 8. Sintesi dei risultati

Funzione obiettivo	Total Time Spent [veic s]	Consumo EV [kWh]	Consumo ICEV [l]	Ritardo totale [s]	Valore finale della funzione obiettivo
Min TTS	126424	194.31	141.92	31697	126424
Min consumo EV	748006	161.75	146.81	346914	161.75
Min multiobiettivo	242221	170.64	157.12	141887	0.34

4 Ottimizzazione bi-livello semaforica: progettazione semaforica ed ottimizzazione della velocità

Questa sottosezione mostra i risultati della procedura di ottimizzazione iterativa bi-livello.

Si evidenzia nuovamente che questo caso studio è stato introdotto per dare enfasi alla innovazione della framework multiobiettivo proposta; in particolare è prassi nella letteratura focalizzare sulla ottimizzazione delle velocità e su applicazioni GLOSA (combinazione della ottimizzazione statica del piano di semaforizzazione con la ottimizzazione della velocità) in ottica di minimizzazione dei consumi, laddove la ottimizzazione multi-obiettivo dei piani di semaforizzazione non è per nulla approfondita.

Nella prima fase, la procedura inizia con la minimizzazione TTS variando i tempi dei verdi e gli sfasamenti dei piani di semaforizzazione. Quindi, la velocità dei veicoli in prossimità degli incroci viene variata (ottimizzata) in maniera coerente con gli effettivi piani di semaforizzazione con l’obiettivo di ridurre al minimo il consumo di energia dei veicoli elettrici. Questa procedura continua in maniera iterativa fino a minimizzare entrambi i due indicatori avendo identificato come criterio di arresto la minimizzazione della distanza euclidea di entrambi gli indicatori (in riferimento alla tabella seguente, il valore ottimale viene raggiunto alla seconda iterazione; vedi risultati in grassetto).

Tabella 9. Sintesi dei risultati della applicazione della procedura di ottimizzazione bi-livello

TTS [veh s]	Consumo EV [kWh]	TD [s]	distanza rispetto al min min TTS [adim]	distanza rispetto al min consumo EV [adim]	distanza [adim]	velocità desiderata minima [cell/s]	velocità desiderata [cell/s]	velocità desiderata massima [cell/s]	Criterio	iterazione
19810	32.71	4380	0.00	1.00	1.00	9	9	9	Min TTS	0
25727	30.57	5166	1.00	0.00	1.00	3	3	6	Min EV Cons	0
22016	31.93	2901	0.37	0.63	0.74	3	3	6	Min TTS	1
22043	31.83	2891	0.38	0.59	0.70	3	3	11	Min EV Cons	1
21252	31.74	2650	0.24	0.55	0.60	3	3	11	Min TTS	2
23481	31.21	4072	0.62	0.30	0.69	3	3	7	Min EV Cons	2
21722	32.24	2842	0.32	0.78	0.85	3	3	7	Min TTS	3
22773	31.95	3682	0.50	0.64	0.82	3	3	6	Min EV Cons	3

La tabella 9 mostra il valore degli indicatori per ogni iterazione. In questa tabella è possibile osservare che applicando la procedura di ottimizzazione della velocità si ottiene una soluzione migliore che consente di incrementare il valore degli indicatori in particolare di circa il 18% in termini di TTS e circa l'8% in termini di consumo degli EV. Questi risultati indicano che l'ottimizzazione multi-obiettivo supera in termini di prestazioni l'ottimizzazione della velocità poiché il TTS è peggiore di circa il 5% mentre il consumo di energia EV è peggiore di quasi il 4%.

5 Conclusioni e prospettive future

L'obiettivo di questo report è quello di illustrare le attività condotte in questo secondo anno di collaborazione con ENEA, che corrisponde alla terza annualità nel Piano Triennale di Realizzazione (PTR) 2019-2021 del progetto Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali.

Gli obiettivi principali di questo studio sono i seguenti: (i) lo sviluppo di un'ottimizzazione multi-obiettivo inclusa l'ottimizzazione dei consumi dei veicoli elettrici dove la funzione di consumo di riferimento è stata specificata ed applicata opportunamente e (ii) l'applicazione di questa metodologia per diverse categorie di veicoli secondo i diversi sistemi di alimentazione, ICEV, e veicoli elettrici.

Il framework di ottimizzazione multi-obiettivo proposto, che mira a minimizzare il TTS e l'EC dei veicoli elettrici, è composto da tre sotto-modelli:

- (1) il modello di controllo del traffico finalizzato alla progettazione delle variabili decisionali del semaforo (ossia la durata delle fasi);
- (2) il modello di flusso di traffico per la stima di TTS come indicatore di prestazione della rete, ed infine
- (3) il modello specifico per EV finalizzato alla stima di una EC alle intersezioni.

Il framework di ottimizzazione è stato implementato su una rete a cinque nodi in cui una volta che i veicoli si avvicinano alla zona di controllo, si presume che siano connessi con la infrastruttura e le informazioni possono essere scambiate tra ciascun veicolo e il semaforo. Questo scenario è chiaramente realistico e coerente con i riferimenti in termini di comunicazione in contesti del tipo V2X. I dati reali sulle singole traiettorie alle intersezioni semaforizzate sono stati utilizzati per calibrare il modello VT-CPEM (Fiori et al., 2016) adottato per sviluppare una funzione di consumo di energia macroscopica basata sul collegamento per veicoli elettrici derivata da dati microscopici.

Più in dettaglio, le simulazioni numeriche sono state effettuate considerando un tasso di penetrazione EV del 100%. I risultati hanno evidenziato che ICEV ed EV hanno comportamenti diversi; per l'ottimizzazione monobiettivo basata su TTS, il valore minimo di consumo è stato raggiunto dall'ICEV, mentre questo non è stato osservato per i veicoli elettrici; in questo senso, l'ottimizzazione multi-obiettivo può essere considerata solo per il consumo di veicoli elettrici. Inoltre, utilizzando l'ottimizzazione multi-obiettivo per il confronto, gli indicatori sono peggiorati per ogni ottimizzazione monobiettivo di circa il 12% per il TTS e del 3% per il consumo di EV. Confrontando i risultati delle ottimizzazioni monobiettivo, quando il TTS è ridotto al minimo, il consumo di EV è stato di circa il 12% superiore al minimo. Nel frattempo, riducendo al minimo il consumo di veicoli elettrici, il TTS era di circa il 30% superiore rispetto al minimo.

Confrontando l'indicatore delle prestazioni del tempo di attesa rispetto al suo valore minimo, è stato di circa il 63% più alto per la minimizzazione del consumo di veicoli elettrici, mentre era quasi del 32% più alto per l'ottimizzazione multi-obiettivo.

Inoltre, applicando la procedura di ottimizzazione della velocità (GLOSA), la soluzione migliore ha avuto un incremento del valore degli indicatori rispetto ai rispettivi valori minimi: circa il 18% per il TTS e quasi l'8% per il consumo di veicoli elettrici. Questi risultati evidenziano che l'ottimizzazione multi-obiettivo fornisce delle prestazioni migliori rispetto all'ottimizzazione della velocità (GLOSA) ed in particolare nel caso della ottimizzazione della velocità (GLOSA) si osserva un peggioramento dei valori minimi di TTS e consumo di energia dei veicoli elettrici rispettivamente peggiori di circa il 4% ed il 5% rispetto ai valori ottenuti nel caso della ottimizzazione multi-obiettivo.

Una delle direzioni di ricerca di sviluppo dello studio è quella di avanzare ulteriormente il framework puntando ad integrare le componenti relative al controllo del veicolo in particolare la velocità ed altri parametri della cooperazione, connessione ed automazione del veicolo ed inoltre integrare l'impatto della scelta del percorso ed eventualmente dell'orario di partenza. In tal senso nelle prospettive future dello studio potrebbero essere evidenziati non solo gli impatti locali dettati dalla cooperazione, connessione ed automazione ma anche gli impatti estesi a livello di intera rete.

Riferimenti bibliografici

- Al Islam, S. B. and Hajbabaie, A., 2017. Distributed coordinated signal timing optimization in connected transportation networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80:272–285.
- Ali, M.M., Törn, A., 2004. Population set-based global optimization algorithms: some modifications and numerical studies. *Comput. Oper. Res.* 31, 1703–1725.
- Asadi, B., & Vahidi, A. (2010). Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time. *IEEE transactions on control systems technology*, 19(3), 707-714.
- Bandeira, J. M., Fernandes, P., Fontes, T., Pereira, S. R., Khattak, A. J., & Coelho, M. C. (2018). Exploring multiple eco-routing guidance strategies in a commuting corridor. *International Journal of Sustainable Transportation*, 12(1), 53-65.
- Beak, B., Head, K. L., and Feng, Y., 2017. Adaptive coordination based on connected vehicle technology. *Transportation Research Record*, 4 2619(1):1–12.
- Ben-Elia, E., Di Pace, R., Bifulco, G. N., & Shifan, Y. (2013). The impact of travel information's accuracy on route-choice. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, 146-159.
- Bifulco, G. N., Cantarella, G. E., Simonelli, F., & Velonà, P. (2016). Advanced traveller information systems under recurrent traffic conditions: Network equilibrium and stability. *Transportation Research Part B: Methodological*, 92, 73-87.
- Brooker, A., Gonder, J., Wang, L., Wood, E., Lopp, S., Ramroth, L., 2015. FASTSim: A model to estimate vehicle efficiency, cost and performance. SAE Technical Paper.
- Cantarella, G.E., de Luca, S., Di Pace, R., Memoli, S., 2015. Network Signal Setting Design: meta-heuristic optimization methods. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 55, 24–45.
- Cascetta, E. (2013). *Transportation systems engineering: theory and methods* (Vol. 49). Springer Science & Business Media.
- Chan, C.C., 2007. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proc. IEEE* 95, 704–718.
- Chan, C.C., Wong, Y.S., 2004. Electric vehicles charge forward. *IEEE Power Energy Mag.* 2, 24–33.
- Daganzo, C. F. (1994). The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 28(4), 269-287.
- Das S, Konar A, Chakraborty UK (2005), Two Improved Differential Evolution Schemes for Faster Global Search, ACM-SIGEVO Proceedings of GECCO' 05, Washington D.C., pp. 991–998.
- De Nunzio, G., De Wit, C. C., Moulin, P., & Di Domenico, D. (2016). Eco-driving in urban traffic networks using traffic signals information. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 26(6), 1307-1324.
- Di Pace, R., 2020. A traffic control framework for urban networks based on within-day dynamic traffic flow models. *Transp. Transp. Sci.* 16, 234–269.
- Fajardo, D., Au, T. C., Waller, S. T., Stone, P., & Yang, D. (2011). Automated intersection control: Performance of future innovation versus current traffic signal control. *Transportation Research Record*, 2259(1), 223-232.
- Feng, Y., Head, K. L., Khoshmasham, S., and Zamanipour, M., 2015. A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55:460–473.

- Feng, Y., Zamanipour, M., Head, K. L., & Khoshmashgham, S. (2016). Connected vehicle-based adaptive signal control and applications. *Transportation Research Record*, 2558(1), 11-19.
- Fiori, C., Ahn, K., Rakha, H.A., 2016. Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. *Appl. Energy* 168, 257–268.
- Fiori, C., Ahn, K., Rakha, H.A., 2018. Microscopic series plug-in hybrid electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 63, 175–185.
- Fiori, C., Arcidiacono, V., Fontaras, G., Makridis, M., Mattas, K., Marzano, V., Thiel, C., Ciuffo, B., 2019. The effect of electrified mobility on the relationship between traffic conditions and energy consumption. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 67, 275–290.
- Fiori, C., Marzano, V., 2018. Modelling energy consumption of electric freight vehicles in urban pickup/delivery operations: analysis and estimation on a real-world dataset. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 65, 658–673.
- Fiori, C., Marzano, V., Punzo, V., Montanino, M., 2020. Energy Consumption Modeling in Presence of Uncertainty. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*
- Goodall, N. J., Smith, B. L., & Park, B. (2013). Traffic signal control with connected vehicles. *Transportation Research Record*, 2381(1), 65-72.
- Han, Y., Wang, M., He, Z., Li, Z., Wang, H., & Liu, P. (2021). A linear Lagrangian model predictive controller of macro-and micro-variable speed limits to eliminate freeway jam waves. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 128, 103121.
- Hayes, J.G., De Oliveira, R.P.R., Vaughan, S., Egan, M.G., 2011. Simplified electric vehicle power train models and range estimation, in: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2011 IEEE. IEEE, pp. 1–5.
- He, X., Liu, H. X., & Liu, X. (2015). Optimal vehicle speed trajectory on a signalized arterial with consideration of queue. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 61, 106-120.
- Helms, H., Pehnt, M., Lambrecht, U., Liebich, A., 2010. Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions, in: *18th International Symposium Transport and Air Pollution*. Citeseer, pp. 113–124.
- Holland, J.H., Goldberg, D., 1989. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Mass. Addison-Wesley.
- Homchaudhuri, B., Vahidi, A., Pisu, P. 2017. Fast Model Predictive Control-Based Fuel Efficient Control Strategy for a Group of Connected Vehicles in Urban Road Conditions. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(2), 760-767. doi:10.1109/tcst.2016.2572603
- Kamalanathsharma, R.K., Rakha, H.A., Yang, H., 2015. Networkwide impacts of vehicle ecospeed control in the vicinity of traffic signalized intersections. *Transp. Res. Rec.* 2503, 91–99.
- Katsaros, K., Kernchen, R., Dianati, M., & Rieck, D. (2011, July). Performance study of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) application using an integrated cooperative ITS simulation platform. In *2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference* (pp. 918-923). IEEE.
- Kim, N., Rousseau, A., Rask, E., 2012. Autonomie model validation with test data for 2010 Toyota Prius. *SAE Technical Paper*.
- Koski, J. (1981). *Multicriterion optimization in structural design*. TAMPERE UNIV OF TECHNOLOGY (FINLAND).
- Koski, J., & Silvennoinen, R. (1987). Norm methods and partial weighting in multicriterion optimization of structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24(6), 1101-1121.

- Koski, J., 1981. Multicriterion optimization in structural design. TAMPERE UNIV OF TECHNOLOGY (FINLAND).
- Koski, J., Silvennoinen, R., 1987. Norm methods and partial weighting in multicriterion optimization of structures. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 24, 1101–1121.
- Lampinen, J., Storn, R., 2004. Differential evolution, in: *New Optimization Techniques in Engineering*. Springer, pp. 123–166.
- Le, T., Kovačcs, P., Walton, N., Vu, H. L., Andrew, L. L., and Hoogendoorn, S. S., 2015. Decentralized signal control for urban road networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58:431–450.
- Lee, B., Lee, S., Cherry, J., Neam, A., Sanchez, J., Nam, E., 2013. Development of advanced light-duty powertrain and hybrid analysis tool. SAE Technical Paper.
- Levin, M. W., & Boyles, S. D. (2016a). A cell transmission model for dynamic lane reversal with autonomous vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 68, 126-143.
- Levin, M. W., & Boyles, S. D. (2016b). A multiclass cell transmission model for shared human and autonomous vehicle roads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 62, 103-116.
- Li, M., Boriboonsomsin, K., Wu, G., Zhang, W.-B., Barth, M., 2009. Traffic energy and emission reductions at signalized intersections: a study of the benefits of advanced driver information. *Int. J. Intell. Transp. Syst. Res.* 7, 49–58.
- Li, M., Wu, X., He, X., Yu, G., Wang, Y., 2018. An eco-driving system for electric vehicles with signal control under V2X environment. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 93, 335–350.
- Li, S., Huang, Y., Mason, S.J., 2016. A multi-period optimization model for the deployment of public electric vehicle charging stations on network. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 65, 128–143.
- Li, W. and Ban, X., 2018. Connected vehicles based traffic signal timing optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 33 20(12):4354–4366.
- Li, X., & Sun, J. Q., 2018. Signal multiobjective optimization for urban traffic network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(11), 3529-3537.
- Li, X., & Sun, J. Q., 2019a. Intersection multi-objective optimization on signal setting and lane assignment. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 525, 1233-1246.
- Li, X., & Sun, J. Q., 2019b. Multi-objective optimal predictive control of signals in urban traffic network. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23(4), 370-388.
- Liebner, M., Klanner, F., Baumann, M., Ruhlhammer, C., & Stiller, C. (2013). Velocity-based driver intent inference at urban intersections in the presence of preceding vehicles. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 5(2), 10-21.
- Liu, K., Liu, D., Li, C., Yamamoto, T., 2019. Eco-Speed Guidance for the Mixed Traffic of Electric Vehicles and Internal Combustion Engine Vehicles at an Isolated Signalized Intersection. *Sustainability* 11, 5636.
- Luo, Y., Li, S., Zhang, S., Qin, Z., Li, K., 2017. Green light optimal speed advisory for hybrid electric vehicles. *Mech. Syst. Signal Process.* 87, 30–44.
- Ma, J., Li, X., Zhou, F., Hu, J., & Park, B. B. (2017). Parsimonious shooting heuristic for trajectory design of connected automated traffic part II: computational issues and optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 95, 421-441.
- Ma, W., Wan, L., Yu, C., Zou, L., Zheng, J., 2020. Multi-objective optimization of traffic signals based on vehicle trajectory data at isolated intersections. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 120, 102821.

- Marmaras, C., Xydas, E., Cipcigan, L., 2017. Simulation of electric vehicle driver behaviour in road transport and electric power networks. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 80, 239–256.
- Memoli, S., Cantarella, G.E., de Luca, S., Di Pace, R., 2017. Network signal setting design with stage sequence optimization. *Transp. Res. Part B Methodol.* 100, 20–42.
- Nagel, K., & Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de physique I*, 2(12), 2221-2229.
- Newman, K.A., Doorlag, M., Barba, D., 2016. Modeling of a Conventional Mid-Size Car with CVT Using ALPHA and Comparable Powertrain Technologies. SAE Technical Paper.
- O’Hora, B., Perera, J., Brabazon, A., 2006. Designing radial basis function networks for classification using differential evolution, in: *The 2006 IEEE International Joint Conference on Neural Network Proceedings*. IEEE, pp. 2932–2937.
- Park, S., Rakha, H., Ahn, K., Moran, K., 2013. Virginia Tech comprehensive power-based fuel consumption model (VT-CPFM): model validation and calibration considerations. *Int. J. Transp. Sci. Technol.* 2, 317–336.
- Pavlovic, J., Marotta, A., Ciuffo, B., 2016. CO2 emissions and energy demands of vehicles tested under the NEDC and the new WLTP type approval test procedures. *Appl. Energy* 177, 661–670.
- Price, K.V., 2013. Differential evolution, in: *Handbook of Optimization*. Springer, pp. 187–214.
- Priemer, C., & Friedrich, B. (2009, October). A decentralized adaptive traffic signal control using V2I communication data. In *2009 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 1-6). IEEE.
- Qu, X., Zhang, J., & Wang, S., 2017. On the stochastic fundamental diagram for freeway traffic: model development, analytical properties, validation, and extensive applications. *Transportation research part B: methodological*, 104, 256-271.
- Rakha, H.A., Ahn, K., Moran, K., Saerens, B., Van den Bulck, E., 2011. Virginia tech comprehensive power-based fuel consumption model: Model development and testing. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 16, 492–503.
- Rao, S. S., & Freiheit, T. I. (1991). A modified game theory approach to multiobjective optimization. Rao, S.S., Freiheit, T.I., 1991. A modified game theory approach to multiobjective optimization.
- Robertson, D. I. (1979). *Traffic Models and Optimum Strategies of Control: A Review: Paper for the International Symposium on Traffic Control Systems*, University of California, Berkeley, August 1979. Transport and Road Research Laboratory.
- Robertson, D.I., Bretherton, R.D., 1991. Optimizing networks of traffic signals in real time-the SCOOT method. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 40, 11–15.
- Sobol, I.M., 1976. Uniformly distributed sequences with an additional uniform property. *USSR Comput. Math. Math. Phys.* 16, 236–242.
- Stevanovic, A., Stevanovic, J., Zhang, K., Batterman, S., 2009. Optimizing traffic control to reduce fuel consumption and vehicular emissions: Integrated approach with VISSIM, CMEM, and VISGAOST. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 105–113.
- Storani, F, Di Pace, R. de Luca S (2021) A hybrid traffic flow model for traffic management with human-driven and connected vehicles submitted to *Transportmetrica B – the paper is at second round review – [if requested we can provide the full version of the paper to the editor and the referees at any time of the review process]*
- Storani, F., Di Pace, R., Bruno, F., & Fiori, C. (2021). Analysis and comparison of traffic flow models: a new hybrid traffic flow model vs benchmark models. *European Transport Research Review*, 13(1), 1-16.

- Storn, R., 1996. On the usage of differential evolution for function optimization, in: Fuzzy Information Processing Society, 1996. NAFIPS., 1996 Biennial Conference of the North American. IEEE, pp. 519–523.
- Storn, R., Price, K., 1997. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *J. Glob. Optim.* 11, 341–359.
- Tie, S.F., Tan, C.W., 2013. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 20, 82–102.
- Waide, P., Brunner, C.U., 2011. Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems.
- Wang, M., Daamen, W., Hoogendoorn, S. P., & van Arem, B. (2016). Connected variable speed limits control and car-following control with vehicle-infrastructure communication to resolve stop-and-go waves. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 20(6), 559-572.
- Wang, M., Hoogendoorn, S. P., Daamen, W., van Arem, B., & Happee, R. , 2015. Game theoretic approach for predictive lane-changing and car-following control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58, 73-92.
- Wang, Y.-W., Lin, C.-C., 2013. Locating multiple types of recharging stations for battery-powered electric vehicle transport. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 58, 76–87.
- White paper 2011 - Mobility and Transport - European Commission [WWW Document], 2011. . Mobil. *Transp.* URL /transport/themes/strategies/2011_white_paper_en (accessed 1.23.18).
- Will, C., Schuller, A., 2016. Understanding user acceptance factors of electric vehicle smart charging. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 71, 198–214.
- Wipke, K.B., Cuddy, M.R., Burch, S.D., 1999. ADVISOR 2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 48, 1751–1761.
- Wu, X., Freese, D., Cabrera, A., Kitch, W.A., 2015a. Electric vehicles’ energy consumption measurement and estimation. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 34, 52–67.
- Wu, X., He, X., Yu, G., Harmandayan, A., Wang, Y., 2015b. Energy-optimal speed control for electric vehicles on signalized arterials. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 16, 2786–2796.
- Yang, H., Rakha, H., & Ala, M. V. (2016). Eco-cooperative adaptive cruise control at signalized intersections considering queue effects. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(6), 1575-1585.
- Yang, H., Rakha, H., Ala, M.V., 2016. Eco-cooperative adaptive cruise control at signalized intersections considering queue effects. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 18, 1575–1585.
- Yang, R. J., Tseng, L., Nagy, L., & Cheng, J. (1994, September). Feasibility study of crash optimization. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 97683, pp. 549-556). American Society of Mechanical Engineers.
- Yang, R.J., Tseng, L., Nagy, L., Cheng, J., 1994. Feasibility study of crash optimization, in: ASME. pp. 549–556.
- Yin, Y., Li, M., Skabardonis, A., 2007. Offline offset refiner for coordinated actuated signal control systems. *J. Transp. Eng.* 133, 423–432.
- Zegeye, S.K., De Schutter, B., Hellendoorn, H., Breunese, E., 2009. Reduction of travel times and traffic emissions using model predictive control, in: 2009 American Control Conference. IEEE, pp. 5392–5397.

- Zegeye, S.K., De Schutter, B., Hellendoorn, J., Breunese, E.A., Hegyi, A., 2013. Integrated macroscopic traffic flow, emission, and fuel consumption model for control purposes. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 31, 158–171.
- Zhang, R., Yao, E., 2015. Eco-driving at signalised intersections for electric vehicles. *IET Intell. Transp. Syst.* 9, 488–497.
- Zhao, H. X., He, R. C., & Yin, N. (2021). Modeling of vehicle CO₂ emissions and signal timing analysis at a signalized intersection considering fuel vehicles and electric vehicles. *European Transport Research Review*, 13(1), 1-15.
- Zhao, J., Li, W., Wang, J., & Ban, X. (2015). Dynamic traffic signal timing optimization strategy incorporating various vehicle fuel consumption characteristics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6), 3874-3887. Zegeye, S.K., 2011. Model-based traffic control for sustainable mobility. Thesis Technische Universiteit Delft TUD.
- Zhou, F., Li, X., & Ma, J. (2017). Parsimonious shooting heuristic for trajectory design of connected automated traffic part I: Theoretical analysis with generalized time geography. *Transportation Research Part B: Methodological*, 95, 394-420.
- Zhu, F., & Ukkusuri, S. V. (2017). Efficient and fair system states in dynamic transportation networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 104, 272-289.
- Zhu, F., & Ukkusuri, S. V. (2018). Modeling the proactive driving behavior of connected vehicles: A cell-based simulation approach. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(4), 262-281.
- Zhu, F., Lo, H.K., Lin, H.-Z., 2013. Delay and emissions modelling for signalised intersections. *Transp. B Transp. Dyn.* 1, 111–135.

6 Abbreviazioni ed acronimi

CA: Cellular Automata

CTM: Cell Transmission Model

CAV: Connected and Automated vehicles

CV: Connected vehicles

EC: Energy Consumption

EV: Electric Vehicle

ITS: Intelligent Transportation System

PE: Percentage Error

PHEV: Plug-in Electric Vehicle

RMSE: Root Mean Square Error

SOC: State Of Charge

TET-TCSA: Trajectories Extraction Tool for Traffic Control Systems Applications

TTS: travel time spent

VT-CPEM: Virginia Tech Comprehensive Power-based Electric vehicle energy consumption Model

7 Appendice: curriculum scientifico del gruppo di lavoro

CV Stefano de Luca

Stefano de Luca, dottore di ricerca in Ingegneria dei Trasporti, è professore ordinario dal 2020 .s.d. ICAR/05-Trasporti presso Dipartimento di Ingegneria Civile (DICIV) dell'Università di Salerno (UNISA) ed è stato professore associato dal 2011 al 2020 e ricercatore dal 2004 al 2011 presso lo stesso dipartimento. È titolare del corso di Pianificazione dei Trasporti (dall'a.a. 2006/2007) e del corso di Teoria dei Sistemi di trasporto (dall'a.a. 2013/2014). È stato, inoltre, titolare dei corsi di Tecnica ed Economia dei Trasporti, di Ricerca operativa per l'analisi del rischio e di numerosi moduli didattici nell'ambito di corsi e master post-universitari, oltre che relatore o correlatore di più di 100 tesi di laurea. È autore di oltre 100 pubblicazioni scientifiche su riviste, libri ed atti di convegno nazionali ed internazionali. È membro dell'editorial board di Transportation Research part F, Journal of Advanced Transportation e Sustainability, nonché revisore per molte delle principali riviste del settore. Direttore e responsabile scientifico del Laboratorio di Analisi di Sistemi di Trasporto presso il DICIV di UNISA, è delegato del Rettore alla "Mobilità da/verso l'Università", delegato al trasferimento tecnologico del DICIV e Presidente della commissione orari del cluster dei Dipartimenti di Ingegneria. Attualmente è responsabile scientifico di attività nell'ambito di progetti COST, POR e PON. È stato vice-coordinatore del Corso di Dottorato di Ricerca in Rischio e Sostenibilità nei Sistemi dell'Ingegneria Civile Edile ed ambientale ed è stato coordinatore locale di progetti di ricerca di rilevante interesse nazionale (PRIN) e responsabile scientifico di progetti di ricerca nell'ambito di finanziamenti PON e di Ateneo. Collabora con centri di ricerca italiani e esteri (ISFORT, Laboratorio LAERTE, Ce.S.M.A, MobiLab Transport Research Group, LISER, Centro di Competenza Trasporti - TEST scarl) e con le Università di Roma, Napoli, Milano, Reggio Calabria, Luxemburg, Budapest, Aveiro and Extremadura. È stato coordinatore del Tavolo Centrale nazionale di coordinamento delle Aree Logistiche Integrate delle Regioni Campania, Puglia, Basilicata, Calabria e Sicilia per conto del Ministero dei Trasporti ed è stato consulente di RAM per conto del Ministero dei Trasporti per la redazione del documento strategico dell'Area Logistica Campana, è stato responsabile scientifico di attività di consulenza per la Regione Campania, l'Agenzia Mobilità e Ambiente di Milano, la Regione Molise, la Provincia di Salerno, l'Aeroporto di Salerno-Pontecagnano, Salerno Mobilità, l'Autorità Portuale di Salerno, il Consorzio Salernitano Trasporti Pubblici, ACAM e i comuni di Salerno, Avellino, Eboli e Angri.

CV Roberta Di Pace

Roberta Di Pace è attualmente professore associato in ingegneria dei trasporti presso il Dipartimento di Ingegneria Civile (DICIV) dell'Università di Salerno (UNISA). Ha conseguito sia la laurea che il titolo di dottore di ricerca in Ingegneria dei Trasporti presso l'Università degli Studi di Napoli "Federico II", rispettivamente nel 2005 e nel 2009. Dal 2010 al 2015 è stata assegnista di ricerca presso il DICIV di UNISA. Dal 2015 al 2018 è stata ricercatore junior presso lo stesso Dipartimento e dal 2018 al 2021 ricercatore senior (tenure-track). È abilitata a docente di prima fascia. Dal 2015 è docente di Analisi e Controllo del Traffico, Analisi dei Sistemi di Trasporto e Tecnica ed Economia dei Trasporti. Inoltre, è docente di Rischio nei Sistemi Di Trasporto nel Corso di Dottorato in Rischio e Sostenibilità del DICIV. È supervisor e co-supervisor di diversi studenti di laurea e dottorandi. Dal 2010 è membro del laboratorio di Analisi di Sistemi di Trasporto presso il DICIV di UNISA. È membro del board della ITSS Italian Chapter e della Sezione Italia IEEE WIE AG. Fa parte del comitato editoriale di Journal of Advanced Transportation, Mathematical problems in Engineering and Sustainability in Environment. Attualmente è responsabile scientifico di attività nell'ambito di progetti COST, PON e partecipa/ha partecipato a numerosi progetti di ricerca sia a livello internazionale (COST) che nazionale (PON- POR-PRIN). Collabora anche con diversi gruppi di ricerca nazionali e internazionali: l'Università di Napoli 'Federico II', l'Università di

Messina, l'Università di Genova e l'Università di Bari, TUDelft University, l'Università di Luxembourg, l'Università di Bristol, l'Università Technion, la City University of Hong Kong, il centro di ricerca LISER di Luxembourg, l'Università di Scienza e Tecnologia Houari Boumediene di Algeria. I principali temi di ricerca riguardano le seguenti tematiche: cooperative intelligent transportation systems; modelli per la analisi del traffico a dinamica intraperiodale; sistemi di informazione all'utenza; gestione del traffico in tempo reale; modelli di scelta discreta ed i paradigmi alternativi; modelli e gli algoritmi per la assegnazione alle reti di trasporto; modelli rappresentativi dell'apprendimento dei viaggiatori; smart/sustainable mobility; sharing mobility; analisi degli impatti; modellazione e simulazione di un terminal container.

CV Chiara Fiori

Chiara Fiori dal 2019 è ricercatrice presso il Dipartimento di Ingegneria Civile (DICIV) dell'Università di Salerno (UNISA) ed è abilitata a docente di seconda fascia nel SSD ICAR/05 "Trasporti". Ha conseguito il dottorato di ricerca presso l'Università Sapienza di Roma nel 2015. Dal 2016 al 2019 è stata post-doc presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università di Napoli Federico II. Ha maturato molte esperienze di ricerca internazionali come Visiting Research Scientist presso: il MobiLab Transport Research Group dell'Università del Lussemburgo (2020-2021); la Commissione Europea, Joint Research Center, Directorate for Energy, Transport and Climate Change (2017-2018); il Center for Sustainable Mobility del Virginia Tech Transportation Institute, USA (2015-2016); e il Center for Automotive Research della Ohio State University, USA (2013). È stata anche coinvolta come ricercatrice nel progetto europeo 7FP PlanGridEV. È co-docente del corso di Tecnica ed Economia dei Trasporti nei corsi di laurea triennale in Ingegneria Civile; Ambiente & Territorio, Meccanica e Gestionale. È supervisor e co-supervisor di diversi studenti di laurea, borsisti di ricerca e dottorandi. Ha collaborato/collabora in progetti di ricerca nazionali ed internazionali. I suoi temi di ricerca includono: analisi sperimentale, modellazione e simulazione del consumo energetico di veicoli elettrificati (trasporto privato, pubblico e passeggeri) e la valutazione dell'impatto sull'eco-routing e del carico richiesto alla rete elettrica; integrazione di modelli microscopici per la valutazione del consumo di veicoli elettrici con modelli di controllo del traffico; analisi well-to-wheels di veicoli convenzionali, ibridi ed elettrici; modellazione, simulazione e valutazione dell'impatto delle operazioni portuali in contesti urbani; assegnazione dinamica del traffico multi-veicolo.

CV Facundo Storani

Facundo Storani è assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Nel 2021 ha conseguito il titolo di dottore di ricerca in Rischio e Sostenibilità nei Sistemi dell'Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale presso l'Università degli Studi di Salerno con certificazione "Doctor Europaeus" a valle di un periodo di ricerca come visiting PhD Student presso la TUDelft, Paëssi Bassi. Ha una doppia laurea in Ingegneria Civile conseguite nel 2017 presso l'Università degli Studi di Salerno, e l'Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Dal 2017 è membro del laboratorio di Analisi di Sistemi di Trasporto presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Salerno. I principali temi di ricerca riguardano: cooperative intelligent transportation systems; gestione e controllo del traffico; modellazione del flusso di traffico; sistemi di trasporto intelligenti; mobilità intelligente/sostenibile; modelli di scelta discreta; impatti ambientali del trasporto; veicoli connessi e automatizzati; veicoli elettrici.