



Ricerca di Sistema elettrico

Studio e sviluppo di logiche di controllo del traffico in scenari di flotte elettriche e autonome

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

STUDIO E SVILUPPO DI LOGICHE DI CONTROLLO DEL TRAFFICO IN SCENARI DI FLOTTE ELETTRICHE E AUTONOME

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

Giugno 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: 2.27 - Studio e sviluppo di logiche di controllo del traffico in scenari di veicoli elettrici e autonomi

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 (LA 2.27 e 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.....	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
2.1 MODELLI PER LA STIMA DEL CONSUMO DI VEICOLI ELETTRICI.....	7
2.1.1 <i>Modello EV: VT-CPEM</i>	11
2.2 METODI PER IL CONTROLLO DEL TRAFFICO IN AMBITO URBANO.....	13
2.2.1 <i>Metodi per la progettazione delle intersezioni semaforizzate e la ottimizzazione delle velocità alle intersezioni</i>	14
2.3 DESIGN DI UN FRAMEWORK MODELLISTICO INTEGRATO PER IL CONTROLLO DEL TRAFFICO IN TEMPO REALE IN PRESENZA DI FLOTTE DI VEICOLI ELETTRICI ED AUTONOMI.....	19
2.3.1 <i>Modulo per il controllo del traffico</i>	21
2.3.1.1 <i>Strategia multi-obiettivo per la progettazione di rete di intersezioni semaforizzate</i>	21
2.3.1.2 <i>Ottimizzazione della velocità</i>	24
2.3.1.3 <i>Modello Integrato: Progettazione semaforica e Ottimizzazione della velocità</i>	26
2.3.1.4 <i>Considerazioni conclusive</i>	26
2.3.2 <i>Modulo per il consumo dei veicoli elettrici</i>	26
2.3.3 Estrazione traiettorie: Trajectories Extraction Tool for Traffic Control Systems Applications (TET-TCSA) ..	27
2.3.3.1 <i>Ri-calibrazione modello consumo</i>	29
2.3.3.2 <i>Funzione di consumo energetico vs. velocità</i>	31
3 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	32
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	32
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	40
6 APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	41

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 primo anno (annualità 2020) relativo all'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 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.

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

Il documento è strutturato come segue.

Nei paragrafi 2.1 e 2.2 sono discussi diffusamente sia i modelli di consumo dei veicoli elettrici che quelli di progettazione delle intersezioni semaforizzate con lo scopo di individuare, tra quelli disponibili, i migliori strumenti per l'implementazione del framework modellistico integrato proposto.

Il paragrafo 2.3 ha come obiettivo illustrare gli strumenti adottati per lo sviluppo di un framework modellistico integrato per il controllo del traffico in tempo reale in presenza di flotte di veicoli elettrici ed autonomi e per la stima dei consumi energetici.

1 Motivazioni e sintesi delle attività

Come noto, l'Unione Europea (UE) ha fissato un obiettivo ambizioso per riduzione delle emissioni nel Green Deal Europeo, un patto che raccoglie un insieme di iniziative politiche proposte dalla Commissione europea con l'obiettivo generale di raggiungere la neutralità climatica in Europa entro il 2050. L'UE punta infatti ad una riduzione delle emissioni di gas serra (GHG), puntando a una riduzione dell'55% già nel 2030 rispetto ai livelli del 1990 (https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action_en). Inoltre, il primo dei dieci obiettivi per un sistema di trasporto competitivo ed efficiente nell'uso delle risorse è quello di "dimezzare l'uso delle auto alimentate in modo convenzionale nel trasporto urbano entro il 2030; eliminarle gradualmente nelle città entro il 2050", come menzionato nel (EC, 2011).

In questo contesto, i veicoli elettrici sono infatti di comune accordo riconosciuti come una tecnologia chiave per raggiungere emissioni locali prossime allo zero (Chan, 2007; Chan e Wong,

2004) se confrontati con i veicoli convenzionali, con maggiori emissioni di particolato (PM), o ibridi.

Infatti, i veicoli elettrici rappresentano una delle possibili soluzioni per ridurre gli impatti ambientali. La presenza nel loro powertrain di componenti elettrici ed elettronici consente una maggiore efficienza a bordo e la conseguente riduzione del consumo energetico e delle emissioni. Inoltre, questa tecnologia garantisce il recupero dell'energia in frenata e può essere facilmente integrata con sistemi per la produzione di energia da fonti rinnovabili per il perseguimento dell'obiettivo di zero emissioni in area urbana e una riduzione delle emissioni globali.

In generale, emergono, due esigenze primarie:

- a) un'attenta e affidabile stima del consumo energetico e delle emissioni;
- b) un'attenta stima e valutazione del carico richiesto alla rete elettrica.

È, pertanto, importante non solo ridurre gli impatti ambientali da traffico, ma anche ridurre gli impatti sulla rete elettrica, ed è importante comprendere come entrambe i risultati possono essere raggiunti in diverse condizioni di traffico e/o di configurazione della rete stradale.

Recenti studi (Fiori et al. 2019, 2020) dimostrano che i modelli di consumo energetico dei veicoli elettrici rispetto alla variabilità delle caratteristiche del flusso di traffico è molto diverso (anche opposto) a quello dei veicoli convenzionali. Risulta quindi necessario aggiornare tutti i modelli di traffico e di controllo del traffico che abbiamo come obiettivo la stima dell'impatto sul consumo e quindi e, di conseguenza, sia sulle emissioni che sul carico richiesto alla rete elettrica.

Il veicolo elettrico, a sua volta, risulta essere un "elemento di connessione fondamentale" tra la rete di traffico e quella elettrica, tutto ciò che impatta i consumi, come ad esempio il livello di traffico, lo stile di guida, le caratteristiche del percorso etc., si riflette su una specifica quantità di energia richiesta alla rete elettrica. Come i pattern di mobilità si riflettano poi sulla rete elettrica è possibile solo attraverso un'attenta analisi dei consumi dei veicoli elettrici e identificando i fattori che maggiormente li impattano.

In tale scenario, una maggiore penetrazione del mercato dei veicoli elettrificati, specialmente a livello urbano per rispettare gli obiettivi dell'UE, può portare a sovraccarichi della rete elettrica attuale. Inoltre, si prevede inoltre che i sistemi e le tecnologie per il trasporto intelligente (ITS) avranno un grande impatto sulla progettazione e la gestione di sistemi e servizi di trasporto più efficienti e a più basso impatto ambientale, così come sulla gestione delle reti elettriche.

Ridurre gli impatti dei consumi significa anche ridurre gli impatti sulla rete elettrica. Quantificare e prevedere in modo affidabile il carico, dovuto agli EVs, e richiesto alla rete consente anche una gestione ottimale della rete stessa con la conseguente riduzione di perdite e fenomeni di instabilità. Consentirebbe anche di poter progettare in modo adeguato: (i) un potenziamento dell'infrastruttura elettrica; (ii) una gestione efficiente della stessa; (iii) soluzioni con integrazione di sistemi per la produzione di energia da fonti rinnovabili e (iv) schemi di prezzi dinamici per sfruttare la capacità disponibile della rete.

In conclusione, l'identificazione dei principali fattori che possono avere un impatto sui consumi energetici dei veicoli elettrici è la chiave per ridurre le esternalità del trasporto stradale sull'ambiente e sulla salute. Inoltre, una quantificazione affidabile del consumo energetico dei veicoli elettrificati è fondamentale per valutare l'impatto sulla rete elettrica al fine di sostenere lo sviluppo di un'infrastruttura di approvvigionamento energetico più sicura e affidabile.

Accanto alla alimentazione elettrica, un'altra possibile tecnologia da utilizzare per migliorare l'efficienza energetica dei sistemi di trasporto è rappresentata dai veicoli connessi ed in particolare dai veicoli autonomi. Questi ultimi, infatti, consentono da una parte di aumentare il grado di comfort dei passeggeri, dall'altra di fissare obiettivi efficaci ed efficienti puntando ad una ottimizzazione delle partenze e dei percorsi in un'ottica di minimizzazione dei consumi; è opportuno, inoltre, osservare che l'introduzione dei veicoli ad alto livello di automazione favorisce l'incremento del grado di sicurezza lungo le infrastrutture sostituendo al conducente umano un conducente virtuale che sia in grado di gestire in termini di maggiore affidabilità le incompatibilità fra le manovre in conflitto.

In generale non bisogna, inoltre, trascurare l'impatto dell'introduzione di soluzioni integrate che coinvolgano non solo il lato veicolo ma anche il lato infrastruttura. In tal senso emerge la necessità di sviluppare framework modellistici atti a simulare non soltanto l'impatto delle diverse composizioni del flusso veicolare ma anche l'impatto coordinato di strategie di controllo del traffico stradale in tempo reale. In ottica sistemica, si intuisce infatti che ottimizzazione di partenze e percorsi non possa prescindere dalla riprogettazione altresì ottima dei piani di semaforizzazione o comunque dalla attuazione di altre simili strategie di controllo. In un tale contesto emerge, dunque, la necessità di estendere tutte le tecniche finora note al caso dei veicoli elettrici/connessi. In particolare, sarà opportuno estendere le tecniche per lo studio di intersezioni isolate (Cantarella et al., 2014) nonché le tecniche di controllo centralizzato ed eventualmente decentralizzato nel caso delle reti di intersezioni (Cantarella et al., 2015; Di Gangi et al., 2016). È chiaro che qualunque sia la tecnica di progettazione semaforica studiata, in un'ottica di rete, non sarà possibile prescindere dallo studio della modellazione del traffico.

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.

In questa prima annualità (2020) sono state svolte attività relative all'analisi di letteratura e identificazione delle migliori soluzioni adottate in letteratura sia per i modelli per la progettazione delle intersezioni semaforizzate in tempo reale, che per i modelli per la stima del consumo microscopico dei veicoli elettrici.

Per lo 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 è stato necessario, in primo luogo, sviluppare un tool di estrazione delle traiettorie. Tale strumento permette di estrarre porzioni di dati microscopici delle traiettorie su una determinata area della rete (ad esempio in presenza di sistemi di controllo del traffico, sezioni stradali critiche, rotatorie ecc.) Le traiettorie estratte vengono poi utilizzate per ri-calibrare il modello microscopico di consumo dei veicoli elettrici adottato, il VT-CPEM (Fiori et al., 2016). Il modello viene poi applicato per simulare il consumo microscopico di energia degli EV e per stimare una funzione di consumo energetico macroscopico. Tale funzione descrive la relazione matematica tra il consumo di energia e la velocità media del veicolo in una specifica condizione, e può essere utilizzata per integrare la funzione obiettivo nella progettazione della strategia di controllo del traffico.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Modelli per la stima del consumo di veicoli elettrici

La simulazione del consumo dei veicoli è un'area di ricerca ampiamente esplorata. In particolare, molti studi si sono focalizzati sulla simulazione dei veicoli convenzionali (Brooker et al., 2015; Kim et al., 2012; Lee et al., 2013; Newman et al., 2016; Wipke et al., 1999) e solo negli ultimi anni anche veicoli elettrificati hanno iniziato ad essere analizzati (Hayes et al., 2011).

I modelli di consumo (ed emissione) dei veicoli possono essere classificati in vari modi, una prima classificazione suddivide i modelli tra microscopici e macroscopici (Othman et al., 2019).

Per modelli macroscopici si intendono quegli strumenti che forniscono un valore medio di consumo ed emissioni per una determinata distanza percorsa. Tali modelli sono applicati su larga scala e utilizzano dati aggregati relativi alla rete o agli archi dell'infrastruttura stradale. Questi modelli sono meno affidabili di quelli microscopici ma anche più semplici da usare e consentono elaborazioni più veloci. Per utilizzare tali modelli per il calcolo del consumo dei veicoli è importante capire come stimare la velocità media a partire da dati specifici sugli archi. A tali velocità medie viene quindi associato un consumo medio di energia.

I modelli microscopici, invece, assumono variabili cinematiche come ad esempio velocità ed accelerazione come input per calcolare, istantaneamente (e.g. polling frequency di 1 Hz), consumo ed emissioni del veicolo. Generalmente i modelli di consumo microscopico possono essere classificati in due sottocategorie: i modelli data-driven e quelli invece che seguono un approccio basato sul physical modeling. In Figura 1 si riporta la classificazione dei modelli microscopici.

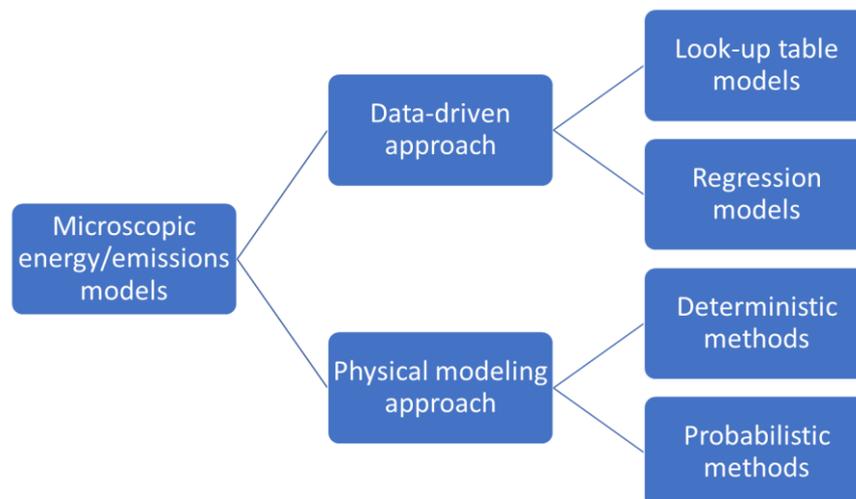


Figura 1. Classificazione dei modelli di consumo ed emissioni microscopici

Data driven approach

Sono modelli microscopici per calcolare il consumo di energia. Si basano sulla raccolta di dati sperimentali, ottenuti, nella maggior parte dei casi, da test eseguiti in laboratorio su un banco dinamometrico. Non è sempre semplice ottenere tali dati e riuscire ad analizzarli, inoltre non sempre i dati di laboratorio sono compatibili con i dati reali ed è questo il prerequisito più critico

nei modelli di consumo. Tra i modelli *data-driven* ci sono basati su *modelli di tabella di ricerca* e i *modelli di regressione*.

- Modelli di tabelle di ricerca (Look-up table models):**
 Un vecchio approccio comune per stimare le emissioni e i tassi di consumo di carburante consiste nell'eseguire dei test al banco dinamometrico e registrare le emissioni e il consumo di carburante in una tabella di ricerca, chiamata anche matrice delle emissioni. Generalmente, tali tabelle di ricerca forniscono un tasso di consumo di energia in funzione dalla velocità e dall'accelerazione (Post et al., 1984; Sturm et al., 1998) per un dato insieme di parametri del veicolo. Queste tabelle di ricerca possono essere utilizzate in seguito per stimare istantaneamente le emissioni e il consumo di carburante. Sebbene questo metodo sia facile da usare, di solito le matrici disponibili sono scarse, a causa delle difficoltà di misurazione. Infine, questo metodo è sensibile al ciclo di guida e alla qualità delle misurazioni effettuate. Ciò può causare errori anche di grandi dimensioni (Othman et al., 2019).
- Modelli di regressione (Regression models):**
 Gli input di questi modelli possono essere tipicamente la velocità, l'accelerazione o la richiesta di potenza e gli output sono la previsione dei tassi di emissione o consumo energetico. Nelle tecniche di regressione è necessario identificare i parametri del modello mediante curve di fitting, mentre nelle reti neurali è da identificare il peso delle connessioni tra i neuroni. L'utilizzo di reti neurali per stimare le emissioni e il consumo di energia è motivato dalla forte non linearità delle emissioni. Richiedono un'elevata potenza di calcolo (Othman et al., 2019).

Physical modeling approach

Un metodo alternativo per calcolare il consumo di energia e le emissioni consiste nell'utilizzare un approccio fisico che porti a modellare parametri con significato fisico. Tra i modelli con approccio fisico più utilizzati ci sono quelli che utilizzano metodi deterministici e quelli che invece adottano metodi probabilistici.

- Metodi deterministici:**
 I tassi di emissione e di consumo energetico possono essere determinati dalla domanda di potenza del motore, che può essere calcolata utilizzando la dinamica longitudinale del veicolo e quindi a partire dalla potenza richiesta alle ruote (Zhang & Yao, 2015b).

Nello specifico è possibile calcolare la potenza alle ruote (P_{Wheels}) a partire dalle forze totali (F_{tot}) necessarie alla trazione dove sarà considerata la componente inerziale ($F_{Inertial}$), quella dovuta al rollio ($F_{Rolling}$), quella aerodinamica ($F_{Aerodynamic}$) e quella legata alla pendenza (F_{Grade}).

$$F_{tot} = F_{Inertial} + F_{Rolling} + F_{Aerodynamic} + F_{Grade} \tag{1}$$

$$P_{Wheels}(t) = F_{tot} * v(t) \tag{2}$$

Nota la potenza alle ruote è possibile calcolare la potenza necessaria per il movimento del veicolo ($P_{Traction}$) e quindi noti i vari rendimenti (η_{tot}) e la distanza percorsa ($Distance$) è possibile calcolare il consumo del veicolo (EC).

$$P_{Traction}(t) = \frac{P_{Wheels}(t)}{\eta_{tot}} \quad (3)$$

$$EC(t) = \frac{\int P_{Traction}(t) * dt}{Distance} \quad (4)$$

- **Metodi probabilistici:**

I modelli precedenti stimano le emissioni e il consumo di energia in funzione delle variabili reali di funzionamento del veicolo (per esempio velocità e accelerazione, richiesta di potenza, meccanica del motore). Tuttavia, questi dati non sono sempre disponibili. Si può ottenere la velocità attraverso l'uso di modelli di simulazione microscopica del traffico ma tali modelli possono essere difficili da implementare, specialmente su una grande scala spaziale con una mancanza di conoscenza precisa delle caratteristiche del tracciato, e possono portare a profili di velocità irrealisticamente piatti. Invece i modelli probabilistici proposti in letteratura sono basati su velocità casuali (*random velocity disturbances*).

L'idea generale dell'approccio *random velocity disturbances* è di adottare i modelli di emissione e di consumo energetico sostituendo, per un dato percorso, la velocità effettiva del veicolo con un profilo approssimativo di velocità, secondo per secondo, costruito da una componente deterministica e una stocastica come di seguito riportato:

$$\tilde{v} = \bar{v} + \theta \quad (5)$$

dove \bar{v} è la velocità media di percorrenza stimata a partire dagli attributi dell'infrastruttura stradale considerata forniti da un sistema d'informazione geografica (ad es. limiti di velocità, pendenza della strada) e θ è una variazione casuale di velocità per il veicolo considerato (Othman et al., 2019).

I modelli di consumo energetico dei veicoli possono anche essere divisi in due categorie: "forward" e "backward models". I modelli che calcolano il contributo di trazione richiesto alle ruote e "lavorano all'indietro" verso il motore sono chiamati "backward models". In alternativa, i modelli che partono dal motore e lavorano con la coppia trasmessa sono chiamati "forward models".

I modelli "forward" sono ampiamente utilizzati nell'industria per identificare le interazioni dei componenti che influenzano i livelli di consumo energetico e le prestazioni del veicolo. Questi modelli, tuttavia, sono caratterizzati da tempi di esecuzione lenti. Mentre nel caso dei modelli "backward", si ottiene una valutazione affidabile del consumo di energia del veicolo sulla base dei dati relativi al ciclo di guida e alle caratteristiche del veicolo. Questi modelli possono essere implementati in un ambiente di simulazione Matlab/Simulink e permettono l'integrazione in

framework più complessi. Tali modelli sono inoltre caratterizzati da tempi di esecuzione rapidi rispetto a quelli “foreward” (Gao et al., 2007).

Nella letteratura disponibile per valutare il consumo di energia di un veicolo elettrificato (e.g. plug-in hybrid electric vehicle) vengono adottate diverse soluzioni come: (1) l'uso di valori di consumo medio forniti, ad esempio, dalle case automobilistiche o ottenuti come risultato da precedenti studi sperimentali; (2) l'uso di simulatori largamente adottati come: l'Advanced Vehicle SimulatOR (ADVISOR) sviluppato dal National Renewable Energy Laboratory (NREL); e Autonomie, il modello di veicolo sviluppato dall'Argonne National Laboratory (ANL); o (3) lo sviluppo *ad hoc* di modelli microscopici (Doucette & McCulloch, 2011; Edwardes & Rakha, 2014; Gao et al., 2007).

L'uso di un valore medio del consumo di energia è un'approssimazione che non permette di cogliere il consumo reale del veicolo elettrico e le differenze di consumo tra i diversi cicli di guida. Inoltre, i valori medi non sono in grado, ad esempio, di riflettere le differenze nel consumo di energia che risultano da un viaggio su una infrastruttura ad alta velocità con diverse fermate e un viaggio lungo un'arteria a bassa velocità senza segnalazione di fermate se entrambi i viaggi hanno velocità medie identiche. (Foley et al., 2013) hanno adottato questo approccio macroscopico, con un valore medio di consumo fornito da (Markel et al., 2009), nel loro lavoro con lo scopo di analizzare gli impatti della ricarica dei veicoli elettrici sulla rete.

Simulatori come ADVISOR e Autonomie hanno uno svantaggio comune, essi dipendono infatti dalla disponibilità di mappe di efficienza del motore/componenti del veicolo, che variano significativamente per tipo di veicolo, con conseguenti problemi di trasferibilità e limitata flessibilità di applicazione. Inoltre, le case automobilistiche, le uniche che potrebbero fornire mappe di efficienza, sono riluttanti a condividere queste mappe a causa di ovvie politiche di protezione dei propri dati.

Questi simulatori non possono essere integrati con le applicazioni ITS a causa della loro complessità e all'elevato tempo di esecuzione rispetto ai modelli microscopici sviluppati *ad hoc*. (Lewis et al., 2014, 2012) hanno utilizzato questo approccio per valutare le emissioni di gas serra nel ciclo di vita di un veicolo elettrico ibrido plug-in in un contesto regionale utilizzando il software Autonomie. Mentre per esempio (Levinson et al., 2011) hanno usato ADVISOR per valutare i potenziali benefici di rivestimenti del veicolo con materiale per convertire l'energia solare. Inoltre, tali simulatori sono spesso a pagamento, come nel caso di Autonomie.

Alcuni modelli sono stati sviluppati specificamente per stimare i livelli di consumo energetico dei veicoli elettrificati.

(Wu et al., 2015) nel loro articolo presentano, con un approccio *data-driven*, un sistema che può raccogliere dati di veicoli elettrici durante il funzionamento su cicli di guida reali. Sono stati raccolti circa 5 mesi di dati e sono stati utilizzati per analizzare sia le prestazioni dei veicoli che il comportamento del conducente. L'analisi ha mostrato che i veicoli elettrici sono più efficienti quando viaggiano su percorsi urbani rispetto alla guida su percorsi extra-urbani. Ulteriori indagini sul comportamento dei conducenti di veicoli elettrici hanno evidenziato che gli utenti hanno trovato un compromesso tra il tempo di viaggio e il consumo di energia. Inoltre, lo studio ha analizzato le relazioni tra la potenza del veicolo elettrico, la velocità del veicolo, l'accelerazione e la

pendenza della strada. Sulla base dei risultati dell'analisi, è stato sviluppato un modello analitico di stima della potenza richiesta dai veicoli.

(Hayes et al., 2011) hanno sviluppato modelli per veicoli elettrici semplificati per quantificare l'impatto del degrado della batteria nel tempo e dei carichi dei sistemi ausiliari sul consumo totale di energia del veicolo. I modelli sono stati confrontati con le specifiche pubblicate dal produttore in vari percorsi e condizioni di guida, e per vari cicli di guida.

(Omar et al., 2013) hanno sviluppato un modello di veicolo plug-in hybrid electric (PHEV) per valutare le prestazioni di diversi sistemi ibridi di stoccaggio dell'energia ricaricabile (RESSs). In particolare, è stata analizzata una combinazione di un sistema di condensatori a doppio strato elettrico (EDLC) con una batteria, per quantificare l'influenza del sistema EDLC sulle prestazioni di potenza, la durata del ciclo, l'efficienza energetica e l'autonomia di guida completamente elettrica.

(Doucette & McCulloch, 2011) hanno proposto un modello per calcolare le emissioni di CO₂ dei veicoli elettrici (EV) e ibridi plug-in (PHEV), e hanno confrontato i risultati con i valori pubblicati per le emissioni di CO₂ dei veicoli convenzionali con motore a combustione interna (ICEV). Tra i risultati è stato stimato che con un mix di generazione di energia ad alta intensità di CO₂, come in Cina, i PHEV avevano il potenziale per essere responsabili di emissioni ridotte di CO₂, in *Tank-To-Wheels*¹ (dal serbatoio alle ruote), durante la loro intera autonomia rispetto a un veicolo elettrico o convenzionale di simili prestazioni. I risultati hanno anche mostrato che i paesi ad alta intensità di CO₂ hanno bisogno di perseguire una maggiore de-carbonizzazione della loro produzione di energia per sfruttare appieno la capacità dei veicoli elettrici e PHEV di ridurre le emissioni di CO₂ dal settore dei trasporti.

Anche se ci sono stati numerosi studi sulla modellazione del consumo energetico dei veicoli elettrici, questi studi sono relativi ad applicazioni limitate. Per esempio, si sono concentrati sulla misurazione del consumo di energia nella strategia di controllo di un veicolo elettrico, su valutazioni di macro-progetti o su analisi semplificate *Well-To-Wheels* (dal pozzo al serbatoio). Nessuno di questi modelli è stato sviluppato in modo tale da poter essere applicato senza raccogliere dati relativi alle mappe di efficienza del motore, e allo stesso tempo poter correttamente modellare il transitorio del veicolo, il recupero di energia in frenata a livello microscopico, mantenendo una semplicità tale da poter essere incorporato all'interno di un software di simulazione del traffico o in applicazioni smartphone.

Il modello che risponde e supera questi limiti, disponibile in letteratura è il VT-CPEM (Fiori et. al, 2016). Tale modello è stato inoltre validato con dati reali presentando un errore inferiore al 6%. Una descrizione dettagliata del modello è riportata nella Sezione 2.1.1.

2.1.1 Modello EV: VT-CPEM

Il Virginia Tech Comprehensive Power-based Electric vehicle energy consumption Model (VT-CPEM) è un modello microscopico *backward highly-resolved power-based* per il calcolo dei consumi di veicoli elettrici. In particolare, il modello richiede come input la velocità istantanea, la pendenza del tracciato, le caratteristiche del veicolo, il carico utile a bordo (payload) e la potenza degli ausiliari, e produce come output il consumo di energia (EC) [kWh/km] del veicolo per un ciclo di guida specifico, la potenza istantanea consumata [kW], e lo stato di carica (SOC) istantaneo della batteria [%] incluso il valore di SOC alla fine della simulazione. Questo modello stima

¹ L'analisi *Tank-To-Wheel* (TTW) considera solo il consumo di energia e le emissioni associate all'utilizzo dei veicoli, trascurando cioè il consumo di energia e le emissioni associate alla produzione di carburante, solitamente prese in considerazione dalla cosiddetta analisi *Well-To-Tank* (WTT). L'analisi *Well-To-Wheels* (WTW) è l'unione dell'analisi *Well-To-Tank* (WTT) e di quella *Tank-To-Wheels* (TTW).

accuratamente il consumo di energia, producendo un errore medio di circa il 6% rispetto ai dati reali (Fiori et al., 2016). Il modello calcola prima la potenza istantanea alle ruote $P_{Wheels}(t)$ (equazione (2)) sulla base del percorso (es. pendenza), della traiettoria (es. profilo di velocità) e delle caratteristiche del veicolo e successivamente è determinata la potenza di trazione istantanea richiesta $P_{Traction}(t)$ sulla base delle efficienze del veicolo (motore, sistema frenante, batterie). Infine, l'integrazione di $P_{Traction}(t)$ su tutta la durata del ciclo di guida permette di calcolare il consumo di energia e la corrispondente variazione dello stato di carica, noto il suo valore all'inizio del ciclo di guida (vedere equazioni (3) e (4)).

Di seguito si riporta la formula applicata per calcolare la potenza richiesta per la trazione ($P_{Traction}$) dove sono presenti i 4 parametri utilizzati per calibrare il modello con dati reali (maggiori dettagli sulle traiettorie utilizzate sono nella Sezione 2.3.2). Ulteriori dettagli sul VT-CPEM sono riportati in (Fiori et al., 2016).

Più in dettaglio, una volta calcolata la potenza alle ruote $P_{Wheels}(t)$ come riportato in (Fiori et al., 2016), si può calcolare la potenza necessaria per fornire trazione $P_{Traction}(t)$ che è pari a:

$$P_{Traction}(t) = \begin{cases} \frac{P_{Wheels}(t)}{\eta_{DL} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{BAT}} & \text{if } P_{Wheels}(t) \geq 0 \\ (P_{Wheels}(t)) \cdot (\eta_{DL} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{BAT}) \cdot \eta_{RB}(t) & \text{if } P_{Wheels}(t) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

dove η_{DL} è l'efficienza della catena cinematica, η_{EM} è l'efficienza del motore elettrico, η_{BAT} è l'efficienza del sistema di batterie e $\eta_{RB}(t)$ è l'efficienza energetica della frenata rigenerativa. Vale la pena ricordare che i tre parametri di efficienza η_{DL} , η_{EM} e η_{BAT} sono caratteristiche intrinseche di ogni veicolo, e di solito cadono tra 0.90 e 0.98: questo permette di impostare adeguati limiti superiori e inferiori nella stima di tali parametri di efficienza, come sarà descritto nella Sezione 2.3.2. Al contrario, il parametro $\eta_{RB}(t)$ è definito in funzione del tempo t come segue, in accordo con (Fiori et al. 2016):

$$\eta_{RB}(t) = \begin{cases} e^{-\frac{\alpha}{|a(t)|}} & \text{if } a(t) < 0 \\ 0 & \text{if } a(t) \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

dove il parametro α dipende dallo specifico veicolo in analisi e dovrebbe quindi essere stimato anch'esso, solitamente nell'intervallo [0.005,1]. In particolare, tale intervallo viene identificato per rispettare i limiti inferiori e superiori attesi dell'efficienza energetica della frenata rigenerativa η_{RB} , come discusso in dettaglio in (Fiori et al., 2016, 2018).

Infine, è importante notare che la potenza dei sistemi ausiliari è considerata come un carico esogeno aggiuntivo ed è sommato alla potenza richiesta per la trazione, $P_{Traction}(t)$ nell'equazione (7).

Un esempio dell'input/output del modello è riportato in Figura 2.

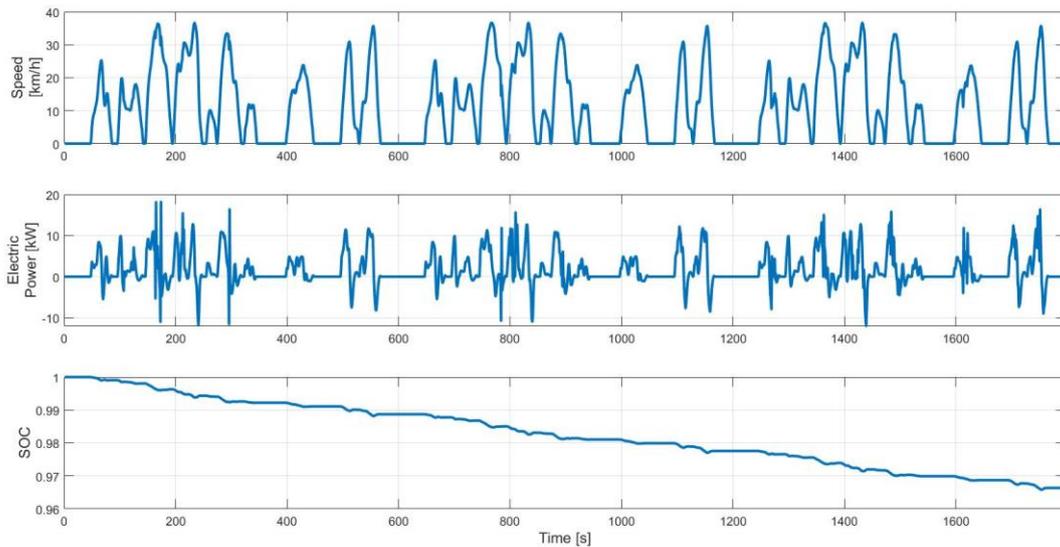


Figura 2. Esempio di Input/Output del modello VT-CPEM.

2.2 Metodi per il controllo del traffico in ambito urbano

Il tema del controllo può essere declinato in maniera differenziata basandosi su approcci diversi a seconda dello specifico contesto sia esso urbano o extraurbano. La motivazione è strettamente legata alla maggiore rilevanza nei due contesti di riferimento della circolazione lungo gli archi (caso dell'ambito extra-urbano) ed ai nodi (caso dell'ambito urbano). Tuttavia, alcune strategie adottate in maniera più significativa in ciascuno dei due contesti possono essere trasferite ed applicate in maniera integrata in altri casi. Il principale contesto di riferimento all'interno di questo studio è quello urbano e l'obiettivo è quello di arrivare alla integrazione di una strategia di controllo con specifiche funzioni di consumo per veicoli elettrici. Prima ancora di definire ed identificare tali strategie è opportuno rimarcare ulteriormente che in ambito urbano alla congestione contribuisce in maniera significativa non tanto il fenomeno della circolazione lungo gli archi quanto il fenomeno della circolazione ai nodi per effetto della interazione fra manovre incompatibili. Le strategie identificate dovranno, dunque, essere tali da ottimizzare prevalentemente il comportamento dei veicoli ai nodi ossia alle intersezioni intervenendo sui fenomeni di arresto (numero degli arresti) oltre che la ottimizzazione dei tempi di viaggio più in generale.

In tale contesto, questa sezione focalizza sulle due principali strategie di controllo del traffico che possono essere adottate in caso di contesti urbani che sono il controllo mediante semaforizzazione ed il controllo basato sulla ottimizzazione delle velocità. Per quanto riguarda la prima strategia, il focus è sull'ottimizzazione multi-obiettivo ossia basata su più criteri contemporaneamente, che, per quanto a conoscenza degli autori, non è stata ancora indagata in letteratura rispetto alle funzioni di consumo energetico e nel caso specifico dei veicoli elettrici. L'altra strategia considerata è l'ottimizzazione della velocità già studiata in letteratura in termini di armonizzazione e minimizzazione degli arresti dei veicoli alle intersezioni, ma effettivamente mai in termini di integrazione con la suddetta strategia di semaforizzazione. Infine, viene descritta ed analizzata in dettaglio la combinazione tra il controllo dei semafori mono-criterio e l'ottimizzazione della velocità attraverso una procedura iterativa.

Di seguito vengono quindi riportati alcuni dettagli relativi ai metodi più frequentemente adottati nel caso delle due diverse strategie identificate.

2.2.1 *Metodi per la progettazione delle intersezioni semaforizzate e la ottimizzazione delle velocità alle intersezioni*

Gli approcci alla soluzione di problemi di progettazione semaforica possono essere di natura statica e dinamica, e la necessità di adottare ciascuno è di fatto legata alla natura intrinseca più o meno caratterizzata da fluttuazioni stocastiche del flusso stesso. I sistemi dinamici, infatti, tengono conto della variabilità del traffico veicolare nel tempo in maniera tale da poter correggere e rendere più efficace la regolazione del traffico adattandosi alle effettive traiettorie dei flussi veicolari. Ciascuno dei due metodi ha un approccio principalmente adottato, che nel caso statico è l'ottimizzazione, mentre nel caso dinamico è il controllo, per quanto nel caso dinamico sia comunque spesso adottata altresì anche la ottimizzazione stessa. Questo studio si concentra sull'approccio statico in quanto l'obiettivo è quello prima di tutto di arrivare alla specificazione di un framework integrato basandosi su un approccio statico predisponendone la trasferibilità al contesto dinamico. In tal senso dal punto di vista modellistico sarà necessario analizzare prevalentemente gli approcci basati sulla ottimizzazione, di seguito descritti in maggiore dettaglio. Più in generale, ai fini della definizione degli indici di prestazione da utilizzare come funzione obiettivo² da ottimizzare, in particolare del ritardo è necessario distinguere tra:

- **intersezioni isolate** se il ritardo può essere calcolato trascurando gli effetti delle intersezioni adiacenti;
- **intersezioni interagenti** se il calcolo deve essere effettuato considerando gli effetti delle intersezioni adiacenti.

Inoltre, nel caso specifico della progettazione dei parametri di regolazione delle intersezioni semaforizzate, è opportuno distinguere (si veda Cantarella e Vitetta, 2010) tra:

- **intersezioni singole;**
- **reti di intersezioni** altrimenti (in questo caso sono comprese anche le arterie);

I singoli metodi di progetto dei parametri di regolazione sono stati trattati in letteratura con vari approcci che verranno descritti brevemente nel seguito (si vedano diversi riferimenti in Papageorgiou et al., 1991).

Sia per le intersezioni isolate che per le reti di intersezioni si punta alla ottimizzazione di una data funzione obiettivo (ad esempio alla minimizzazione dei ritardi e/o a una massimizzazione delle capacità), come riportato nella seguente tabella sintetica.

Con riferimento al *progetto di intersezioni singole, in condizioni di traffico di sotto-saturazione*, sono definibili due problemi principali, caratterizzati da differenti insiemi di variabili:

- **durata dei verdi (*green timing*)**, sono oggetto della progettazione la durata dei periodi di verde degli accessi e del ciclo, assumendo la matrice delle fasi nota. In riferimento alla massimizzazione del fattore di capacità, per un'assegnata durata (massima) del ciclo, il green

² La scelta delle funzioni obiettivo da ottimizzare dipende dal tipo di analisi che si sta conducendo (mono o multi - obiettivo). In tal senso, in altri tipi di studio, potrebbero essere presi a riferimento indicatori sulla sicurezza, sui costi di realizzazione e di manutenzione, sull'impatto ambientale dell'opera etc.

timing può essere affrontato con:

- **Metodo di Webster**, basato sul principio di equisaturazione (Webster, 1958; Webster e Cobbe, 1966) che fornisce, effettuando alcune ipotesi limitative sulla matrice delle fasi, un risultato in forma chiusa;
- **Metodo Sigcap**, che utilizza tecniche di ottimizzazione lineare (Allsop, 1976), ripreso successivamente da vari autori, tra cui i metodi Sidra (Akcelik e Besley, 1992) e Oscady (Burrow, 1987).

In riferimento alla minimizzazione della durata del ritardo totale, il green timing è affrontato con:

- **Metodo Sigset**, che utilizza tecniche di ottimizzazione convessa (Allsop, 1971), successivamente ripreso da vari autori e Oscady.
- durata dei verdi & successione dei periodi (*green timing & scheduling*), sono oggetto della progettazione l'inizio e la durata dei periodi di verde degli accessi e la durata del ciclo. Sia in riferimento alla massimizzazione del fattore di capacità che alla minimizzazione del ritardo totale il *green timing e scheduling* è affrontato con tecniche di ottimizzazione discreta o non lineare (Sicco; Improta e Cantarella, 1984; Cantarella e Improta, 1988).

La regolazione di intersezioni singole in condizioni di traffico di sovrasaturazione è incentrata, invece, sull'allocazione delle code nel rispetto della capacità longitudinale della strada che conduce ad ogni accesso dell'intersezione (Gazis, 1964; si veda anche Gazis in Papageorgiou, 1991).

Con riferimento al progetto di un'arteria si considerano oggetto della progettazione: la durata del *ciclo* (comune a tutte le intersezioni); la durata dei periodi di *verde* degli accessi (con struttura temporale definita dalla matrice delle fasi); la durata dello *sfasamento* tra la regolazione semaforica di ogni coppia di intersezioni adiacenti. I primi due tipi di variabili sono gli stessi del progetto della durata dei verdi. Non risulta sia stata affrontata la regolazione dei verdi e successione dei periodi per ciascuna intersezione se non più recentemente ed non forma chiusa in Cantarella et al. (2017). La progettazione può fare riferimento alla minimizzazione del ritardo, ma molto spesso fa riferimento alla massimizzazione della banda, ossia della durata del periodo di tempo durante il quale un veicolo può attraversare l'arteria senza incontrare rosso (se si muove con un'assegnata velocità). L'ottimizzazione dei soli sfasamenti³ è stata affrontata dal metodo **Maxband** (Little, 1966; Little et al. 1981) e dalla sua estensione **Multiband** (Camus, 1992), che tiene conto anche delle variazioni di flusso lungo l'arteria dovute alle svolte.

Con riferimento al progetto di una rete di intersezioni, in condizioni di sotto-saturazione, si considerano oggetto della progettazione:

³ Lo *sfasamento assoluto* (offset) per l'intersezione h , ϕ_h , definisce l'istante di inizio del piano di regolazione dell'intersezione h rispetto a un valore di riferimento temporale prefissato che può essere l'istante di inizio del piano di regolazione di un'intersezione di riferimento³. In questo caso $(n - 1)$ sfasamenti risultano indipendenti e sufficienti a definire completamente la regolazione, essendo n il numero di intersezioni; infatti una intersezione può essere considerata come intersezione di riferimento considerando nullo il corrispondente sfasamento assoluto. Senza perdita di generalità si può assumere che tutti gli sfasamenti assoluti siano non-negativi nell'intervallo $[0, C]$.

Lo *sfasamento relativo* (relative offset) per ciascuna coppia di intersezioni (h, i) , ϕ_{hi} , è l'intervallo di tempo che intercorre tra l'inizio del piano di regolazione per l'intersezione h e quello per l'intersezione i . Gli sfasamenti relativi possono essere positivi o negativi. Lo sfasamento ϕ_{ih} tra la coppia di intersezioni (i, h) è l'opposto di quello nella direzione opposta ϕ_{hi} , come è facile verificare:

$$\phi_{ih} = - \phi_{hi}$$

- la durata del ciclo di riferimento (per ciascuna intersezione l'effettiva durata del ciclo può essere un sottomultiplo di quella di riferimento);
- la durata dei periodi di verde degli accessi (assumendo nota la matrice delle fasi) per ciascuna intersezione;
- lo sfasamento relativo (è possibile utilizzare gli sfasamenti assoluti anche se questo approccio risulta poco seguito).

Come per le arterie, i primi due tipi di variabili sono gli stessi del progetto della durata dei verdi. Non risulta sia stata mai affrontata la regolazione della durata dei verdi e successione dei periodi.

La progettazione di una rete fa riferimento alla minimizzazione della durata del ritardo totale e per tale obiettivo sono possibili due tipi di approccio:

- **coordinamento** che consiste nell'ottimizzazione degli sfasamenti. Non sono disponibili metodi pratici che utilizzano tale tipo di approccio. Tuttavia, è possibile sviluppare una procedura all'interno del metodo Transyt che consenta questo tipo di progettazione;
- **sincronizzazione**: che consiste nell'ottimizzazione simultanea degli sfasamenti, della durata dei periodi di verde e della durata del ciclo. I metodi basati sui flussi più utilizzati sono: il metodo Transyt (Robertson, 1969), continuamente aggiornato (1987,1991), che utilizza tecniche euristiche di ottimizzazione e si basa, per il calcolo del ritardo totale, su una simulazione esplicita dei fenomeni di dispersione, distorsione e divisione dei plotoni di traffico⁴; il metodo Scoot (si veda Hunt et al.,1981; Bretherton et al., 2005) , che non è altro che una evoluzione di Transyt e che, a differenza di quest'ultimo (che utilizza flussi non variabili nel tempo e può essere, quindi definito come un modello a tempo fisso ovvero *fixed time*), sfrutta dati sui flussi rilevati in tempo reale (*real time*).

La regolazione di reti di intersezioni, in condizioni di sovrasaturazione, avviene con l'obiettivo di allocare le code nel rispetto della capacità longitudinale delle strade che conducono agli accessi dell'intersezioni senza quindi interessare le intersezioni a monte (Michalopoulos e Stephanopolos, 1978; si veda anche Gazis, 1964 e Papageorgiou et al., 1991).

Nel controllo dinamico dei flussi di traffico mediante gli impianti di semaforizzazione, le strategie di regolazione consistono tipicamente nel modificare le fasi e/o il tempo di ciclo di una singola intersezione (controllo di intersezioni isolate), e/o l'offset tra i cicli di due o più intersezioni adiacenti in un'area limitata (controllo locale di più intersezioni), così da influenzare il comportamento dei veicoli, per reagire alle variazioni dinamiche delle condizioni di traffico (Papageorgiou, 2003). Quindi, le politiche di controllo dinamico impiegate nella regolazione del traffico sono principalmente strategie definite traffic-responsive, che utilizzano misurazioni in tempo reale, acquisite tipicamente per mezzo di opportuni sensori, per determinare il piano semaforico migliore selezionandolo in un insieme di piani predeterminati, oppure determinando un piano semaforico ad hoc. Negli ultimi decenni sono stati sviluppati diversi strumenti che consentono di applicare strategie traffic-responsive in aree urbane con intersezioni semaforizzate: SCOOT (Split Cycle Offset Optimization Technique), le diverse versioni di TRANSYT (Hunt et al.,

⁴ Tali effetti vengono valutati attraverso l'utilizzo del modello di dispersione dei plotoni di Robertson. A partire dalla versione 13 di Transyt è possibile usufruire di un ulteriore modello di traffico ovvero il modello a celle di Daganzo (CTM). Le differenze tra i due modelli verranno riprese nei capitoli successivi.

1982), OPAC (Optimization Policies for Adaptive Control) (Gartner, 1983), e UTOPIA (Mauro e Di Taranto, 1989).

Per quanto concerne ancora le funzioni obiettivo è opportuno specificare che si individuano tre principali applicazioni: la prima si riferisce all'ottimizzazione mono-criterio, la seconda alle combinazioni di funzioni che può essere tratta o tenendo conto di una combinazione lineare delle funzioni in oggetto, pesate ciascuna attraverso un opportuno coefficiente oppure attraverso la ottimizzazione multi-criteria e dunque la ottimizzazione di più funzioni contemporaneamente. In tale tipo di analisi è necessario individuare la frontiera di Pareto al fine di rappresentare un insieme di soluzioni ottime. Essa, infatti, costituisce l'insieme di tutti i punti non dominati per i quali non esiste nessun punto che sia migliore contemporaneamente per tutti gli obiettivi considerati nella funzione di ottimizzazione. Così come descritto in letteratura è ammesso che un punto faccia parte della frontiera di Pareto (Horn et al., 1994; si veda anche Zitzler et al., 2001) anche nel caso in cui non domini nessun altro punto, in quanto ciò che prevale è il fatto che non sia dominato.

Come già anticipato, il cuore della metodologia proposta è l'implementazione di una strategia multi-obiettivo che combini un indicatore di prestazione (il tempo di viaggio totale impiegato) ed il consumo di energia. Inoltre, per quanto concerne la strategia risolutiva, che può avvenire attraverso metodo simultaneo o sequenziale; nel primo caso (sincronizzazione), come detto, le durate delle fasi e gli sfasamenti vengono ottimizzati insieme mentre nel secondo caso (coordinamento) la procedura di ottimizzazione viene eseguita in due fasi successive. In questo progetto è stata applicata la procedura di ottimizzazione simultanea.

Tutte le considerazioni finora fatte sono inoltre coerenti con gli sviluppi più recenti relativi al caso specifico dei veicoli connessi. In particolare, è opportuno evidenziare che la ottimizzazione dei consumi dei veicoli, siano essi a combustione interna o veicoli elettrici, può essere attuata solo in caso di contesti di connessione fra veicoli ed infrastruttura. In accordo con la letteratura, ci sono due principali approcci incentrati sul controllo del traffico alle intersezioni tesi ad evidenziare i vantaggi delle tecnologie CAV (Connected and Automated vehicles): il primo è relativo all'ottimizzazione della intersezione stessa ed è trattata in maniera esogena ossia si basa sul controllo del veicolo in termini di velocità e traiettorie quindi viene adottato un piano di semaforizzazione fisso e vengono applicate la velocità adattativa e l'ottimizzazione dell'accelerazione al fine di minimizzare il tempo di arresto agli incroci (Kamalanathsharma e Rakha, 2013; Ma et al., 2017) e aumentare la sicurezza alle intersezioni stesse; la seconda mira all'ottimizzazione diretta delle intersezioni che vengono trattate come variabile endogena del problema e si basa sul progetto dei semafori e sulla gestione cooperativa degli incroci (Stevanovic et al., 2009; Priemer e Friedrich, 2009; He et al., 2012; He et al. (2014); Goodall et al., 2013; 2014; Lee et al. (2013); Feng et al., 2015, 2018; Islam and Hajbabaie, 2017; Beak et al., 2017; Xu, et al., 2018a; 2018b; Wang et al., 2021). Per quanto concerne il secondo approccio, riguardante la gestione delle intersezioni ed in particolare il progetto di intersezioni semaforizzate, i CAV possono essere utilizzati per la stima dello stato del traffico e per garantire la previsione dei flussi di traffico in termini di flussi, velocità, lunghezze delle code in entrambi i casi sia di singole intersezioni che in termini di controllo a livello di rete. Per quanto riguarda lo sviluppo di un sistema di controllo cooperativo (vedi Park et al., 2013), esso mira alla gestione autonoma delle intersezioni (Dresner & Stone, 2004a; Dresner & Stone, 2004b; Dresner & Stone, 2005). In altre parole, la gestione del flusso di traffico può essere trasformata da un paradigma reattivo - aggregato - non cooperativo a

un paradigma proattivo - disaggregato - cooperativo e più in generale lo scopo principale è l'uso delle informazioni relative ai segnali stradali per ridurre i tempi di inattività e il consumo di carburante.

È opportuno, inoltre, evidenziare che molti studi sperimentali hanno mostrato una relazione positiva tra le emissioni dei veicoli e il consumo di carburante con i ritardi regolati mediante piani di semaforizzazione (vedi Li, Boriboonsomsin, Wu, Zhang, & Barth, 2009; Myhrberg, 2008; Pierre & Ehrlich, 2008). Con i recenti progressi tecnologici nel sistema di trasporto intelligente, è ora possibile imporre un maggiore carico di controllo sui veicoli stessi con strategie di guida specifiche orientate alla mitigazione degli impatti. Diversi studiosi hanno sviluppato algoritmi di velocità variabile per il traffico veicolare lungo le arterie (vedi Jimenez, Aparicio, & Paez, 2007; Morsink, Van Nes, Waltaand, & Marchau, 2008; Myhrberg, 2008; Pierre & Ehrlich, 2008; Spyropoulou & Karlaftis, 2008). Più in dettaglio, in letteratura si possono trovare due approcci principali: il primo è basato su una velocità costante o un'accelerazione costante per un singolo guidatore per ridurre il tempo di inattività o il consumo di carburante (Qi et al., 2017; Xia et al., 2012; 2013; Kamal et al., 2015; Rakha e Kamalanathsharma, 2011; Kamalanathsharma et al., 2015; Almutairi et al., 2017; Mandava et al. (2009); Tielert et al. (2010); Treiber e Kesting (2014); Katwijk e Gabriel (2015); Stebbins et al. (2017); Ubiergo e Jin (2016); Jiang et al., 2017; Zohdy, IH, & Rakha, HA (2016)) ed è comunemente chiamato sistema GLOSA (Green Light Optimized Speed Advisory) (Katsaros et al., 2011); il secondo utilizza un controllo ottimo dinamico sulla velocità del singolo veicolo considerando gli stati di traffico effettivi (predittivi) e introduce alcune strategie di guida volte all'ottimizzazione dei profili di velocità (Asadi e Vahidi (2011); Kamal et al. (2015); Wan et al. (2016); De Nunzio et al. (2016); Yang et al., 2016). Inoltre, diversi studi si sono concentrati sullo sviluppo di strategie di controllo per la riduzione dei consumi di carburante per un singolo veicolo senza considerare l'impatto sugli altri veicoli (HomChaudhuri et al. (2017); Zhou et al. (2017) e Ma et al. (2017)) e pochissimi studi mirano a ottimizzare il consumo di carburante per i plotoni di veicoli (Zhao et al., 2018).

Sempre per quanto concerne l'ottimizzazione dell'impatto ed in particolare l'identificazione del consumo di carburante come variabile decisionale, si possono trovare in letteratura alcune indagini preliminari volte ad affrontare l'ottimizzazione multicriterio del controllo del traffico. Tuttavia, in letteratura si possono trovare pochissime applicazioni riguardanti l'ottimizzazione multicriterio (Li e Sun, 2018; 2019a; 2019b; Di Pace, 2020). Più in dettaglio, Stevanovic et al., (2009) hanno proposto uno strumento integrato per l'ottimizzazione dei piani di semaforizzazione fuori linea che combina il consumo di carburante e la riduzione delle emissioni, mentre Zegeye et al. (2009) hanno progettato una strategia di controllo predittivo (MPC – Model Predictive Control) incentrata sul controllo in tempo reale sia del tempo di viaggio totale che delle emissioni totali, e Zegeye et al., (2013) hanno proposto un quadro che combina modelli di flusso di traffico macroscopici ed emissioni microscopiche e modelli di consumo di carburante con riferimento alle reti di traffico autostradale. A livello urbano, Zhu et al., (2013) hanno adottato un approccio simile mirando alla riduzione al minimo dei ritardi e delle emissioni. Tuttavia, tutte le procedure di ottimizzazione combinate sono formulate considerando la combinazione ponderata delle funzioni obiettivo e non la strategia simultanea basata sul metodo multi-obiettivo che è pertanto rilevante studiare ed approfondire.

Inoltre, qualsiasi sia le strategie di semaforizzazione adottata, è da precisare che è necessario predisporre il supporto di un opportuno modello di traffico tale da garantire la stima della funzione obiettivo il cui valore appunto non può essere ottenuto in forma chiusa in quanto risulta

esso stesso risultato della procedura di simulazione (ad esempio se la funzione obiettivo è il ritardo, esso non è noto prima che la simulazione sia stata effettuata).

Pertanto, per quanto concerne la modellazione del flusso veicolare, è stato adottato un approccio del tipo ibrido che si basa sulla combinazione di un modello del macroscopico e quindi a variabili aggregate (Daganzo, 1994) con un modello microscopico e quindi a variabili disaggregate (Nagel, K., & Schreckenberg, M. (1992)). La scelta di una tale tipologia di modello è stata veicolata proprio dalla tipologia di contesto considerato in cui non si intende studiare lungo le arterie della rete la interazione fra veicoli, ma principalmente la interazione del veicolo in prossimità della intersezione con il semaforo stesso. Nello specifico il modello considerato è il modello ibrido (Storani, 2020) CA&CTM (Cellular Automata and Cell Transmission Model).

Infine, è opportuno effettuare qualche ulteriore riflessione sulla ottimizzazione delle velocità. Più in generale, sono state introdotte le strategie volte all'armonizzazione della velocità per migliorare le prestazioni del traffico in termini di circolazione lungo le arterie e lungo i nodi. Alcuni studi preliminari orientati ad evidenziare l'impatto della ottimizzazione delle velocità in particolare sugli incidenti in ambito extraurbano sono stati effettuati da Abdel-Aty et al. (2006), Ha et al. (2003), e Smulders (1990). Ulteriori analisi sono state proposte poi da Aziz e Ukkusuri (2012) e hanno evidenziato l'impatto della ottimizzazione della velocità sulla riduzione delle emissioni. In un contesto specifico di veicoli connessi, Khondaker e Kattan (2015) hanno evidenziato l'effetto delle strategie VSL (Variable Speed Limit) sui tempi di viaggio e sul consumo di carburante. A livello urbano, l'effetto principale dell'ottimizzazione della velocità è legato alla riduzione del consumo di carburante per effetto diretto della minimizzazione del numero di fermate alle intersezioni semaforizzate (Kamalanathsharma et al., 2015; Wan et al., 2016; Xia et al., 2013; He et al., 2015). Come già anticipato nelle sezioni precedenti, in letteratura si possono identificare due approcci principali: il primo si basa su una velocità o accelerazione costante per un singolo guidatore per ridurre il tempo durante il quale il veicolo è fermo in coda in attesa o il consumo di carburante mentre il secondo utilizza un controllo finalizzato a un'ottimizzazione della guida adattiva. Lo scopo principale dell'approccio adottato in questo progetto è quello di garantire l'arrivo dei veicoli durante le fasi di verde del semaforo evitando che il veicolo stesso si arresti e che quindi le variazioni di velocità di un veicolo in prossimità della intersezione consentano di ridurre il consumo di carburante sulla base del diagramma di temporizzazione del semaforo e della fase, dunque, al momento attiva a quel dato semaforo. In conclusione, lo sviluppo modellistico proposto focalizzerà prima di tutto sulla messa a punto per la progettazione semaforica nel caso di reti di intersezioni interagenti. Esso sarà orientato alla minimizzazione di un indicatore di prestazione (travel time spent; time waiting etc.) ed un indicatore relativo al consumo (numero degli arresti; consumo stesso). Inoltre, prima ancora dello sviluppo di un framework per il controllo multi-obiettivo sarà investigata la ottimizzazione basata sulla combinazione pesata di due funzioni contemporaneamente. Infine, per completezza, ed in coerenza con la letteratura, sarà investigata la combinazione fra la progettazione semaforica mono-criterio e la strategia di ottimizzazione della velocità che è noto avere un effetto diretto sulla ottimizzazione del consumo.

2.3 Design di un framework modellistico integrato per il controllo del traffico in tempo reale in presenza di flotte di veicoli elettrici ed autonomi

L'integrazione di modelli di consumo energetico con i sistemi di controllo del traffico, sono disponibili in letteratura in diversi studi riguardanti i veicoli convenzionali (Almutairi et al.,

2017; Kamalanathsharma et al., 2015; Li et al., 2009; Yang et al., 2016) ma solo negli ultimi anni l'attenzione si è concentrata anche sui veicoli elettrici.

Inoltre, al meglio delle conoscenze degli autori, gli studi disponibili su questo argomento adottano, per la valutazione del consumo energetico degli EV, modelli con alcune limitazioni. Ad esempio (Luo et al., 2017) nel loro lavoro si sono focalizzati sullo sviluppo di una nuova strategia di optimal speed advisory per intersezioni semaforizzate consecutive per veicoli ibridi. Hanno adottato come modello di consumo energetico uno modello che adotta mappe di consumo di carburante/energia, che possono essere generate esclusivamente testando un veicolo su un dinamometro. Pertanto, ci sono limitazioni critiche nella flessibilità di adozione di questi modelli come riportato nella letteratura (Fiori et al., 2018; Park et al., 2013).

(Zhang e Yao, 2015a) hanno analizzato l'eco-driving degli EV alle intersezioni semaforizzate utilizzando un modello per la valutazione dei consumi EV del tipo data-driven testato sul New European Driving Cycle (NEDC), che non è considerata una rappresentazione accurata del comportamento di guida in ambiente reale. Il 1° settembre 2017 è stata infatti introdotta una nuova procedura di testing, la World-wide harmonized Light duty Test Procedure (WLTP). Questa procedura di test è stata sviluppata sotto la supervisione dell'UNECE (United Nations Economic Commission for Europe), per fornire condizioni di test uniformi e più realistiche a livello mondiale (Pavlovic et al., 2016).

Nello specifico, nello studio proposto viene adottato il modello microscopico per il calcolo del consumo dei veicoli elettrici VT-CPEM (Fiori et al., 2016), che non è caratterizzato dalle limitazioni citate in precedenza come l'uso della mappa di efficienza, ed è stato inoltre ricalibrato su un dataset specifico di dati reali che include intersezioni semaforizzate. Un dettaglio sulle motivazioni che rendono opportuna la scelta di questo modello nelle applicazioni di interesse, per questo progetto, e delle caratteristiche del modello stesso è riportato nella Sezione 2.1.

La funzione macroscopica di consumo sviluppata, come descritto nei paragrafi che seguono, è integrata nel modulo relativo al controllo del traffico. Dettagli aggiuntivi sulle motivazioni e i metodi adottati nell'adozione e sviluppo di tale modulo sono riportati nella Sezione 2.3.2. In Figura 3 è riportato un dettaglio dello schema del framework modellistico integrato proposto.

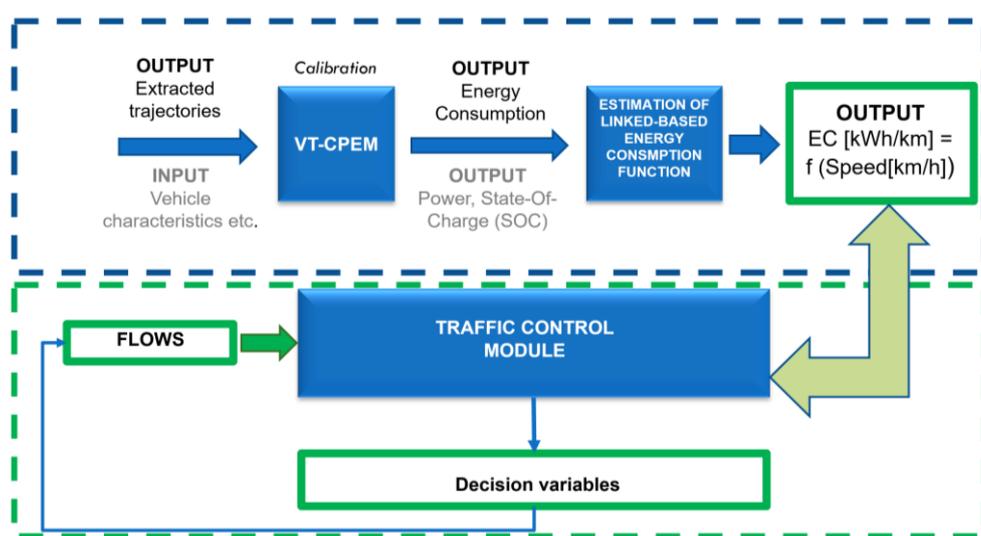


Figura 3. Framework modellistico integrato per il controllo del traffico in tempo reale in presenza di flotte di veicoli elettrici ed autonomi. Nel riquadro tratteggiato in blu è riportato il modulo relativo al consumo dei veicoli elettrici mentre in quello in verde quello relativo al controllo del traffico.

2.3.1 Modulo per il controllo del traffico

In questa sezione vengono descritti i due principali framework modellistici esplorati. Il primo riguarda lo sviluppo di un framework orientata al solo controllo del traffico per reti di intersezioni e si basa sulla ottimizzazione multi-criteria il secondo riguarda lo sviluppo di un framework integrato fra progettazione dei piani di semaforizzazione ed ottimizzazione delle velocità e si basa su di una procedura iterativa del tipo bi-livello.

Infine, è opportuno precisare che in generale in questa applicazione, la zona di controllo alle intersezioni semaforizzate è vincolata alle comunicazioni V2X; in queste zone si presume che i veicoli siano cooperativi e le informazioni sul veicolo e le informazioni SPaT (Signal Phasing and Timing) possano essere scambiate tra il veicolo ed il controllore semaforico. Infatti, SPaT può essere trasmesso direttamente ai veicoli nel raggio d'azione utilizzando la tecnologia Dedicated Short Range Communications (DSRC) (Koukoumidis et al., 2011) o può essere reso disponibile dalla centrale di controllo del traffico attraverso reti cellulari e Wi-Fi.

2.3.1.1 Strategia multi-obiettivo per la progettazione di rete di intersezioni semaforizzate

Definizione delle variabili

In generale la rete di intersezioni è rappresentata da un grafo non orientato con un nodo per ogni intersezione e un arco di collegamento per ciascuna coppia di intersezioni consecutive (le direzioni di traffico effettive sono irrilevanti), con m nodi come numero di intersezioni. Supponendo che la progettazione del piano sia caratterizzata dalla matrice. Di seguito sono preliminarmente definite tutte le grandezze descrittive del problema:

$c > 0$ è il tempo di ciclo, comune a tutte le intersezioni e può essere assunto o noto oppure ricavato attraverso la ottimizzazione stessa, spesso vincolato in un range.

Inoltre, per ciascuna singola intersezione della rete, è possibile definire le seguenti variabili
 $t_j \in [0, c]$ la durata della fase j ed è intesa come variabile di ottimizzazione;

$t_{ar} \in [0, c]$ la durata del tempo di tutto rosso, necessario a garantire l'attraversamento in sicurezza della intersezione nonché il suo completo sgombero prima che si abbia il passaggio alla fase successiva secondo il diagramma di temporizzazione;

$l_k \in [0, c]$ il tempo perso;

$g_k = \sum_j \delta_{kj} t_j - t_{ar} - l_k \in [0, c]$ la durata del verde efficace dell'accesso k ed è necessario a stimare il valore della funzione obiettivo attraverso il supporto di un opportuno modello di traffico;

$q_k > 0$ il flusso in arrivo all'accesso k , ed è assunto noto;

$s_k > 0$ il flusso di saturazione relativo all'accesso k , ed è assunto noto;

In termini di vincoli oltre al vincolo di non negatività della durata delle fasi, viene introdotto il vincolo di consistenza fra la durata delle fasi (la loro somma) ed il ciclo:

$$\sum_j t_j = c$$

Ulteriori vincoli sono in genere introdotti per garantire

Il valore minimo del verde efficace

$$g_k \geq g_{\min} \quad \forall_k$$

E che il valore del fattore di capacità sia maggiore della unità:

$$\left(\frac{s_k \cdot g_k}{c \cdot q_k} \right) \geq 1$$

Tuttavia, questo vincolo può essere aggiunto solo dopo avere verificato che il massimo fattore di capacità per ciascun accesso sia maggiore della unità, diversamente potrebbe non esistere la soluzione qualsiasi sia la funzione obiettivo considerata.

Infine, nel caso specifico delle reti di intersezioni viene introdotto lo sfasamento ed in particolare per ciascuna intersezione i

$\phi_i \in [0, c]$ rappresenta il distanziamento temporale fra l'inizio della fase di verde nella intersezione di monte e quelle successive; nel caso in cui per più intersezioni in sequenza il calcolo dello sfasamento venga mantenuto sempre rispetto alla stessa intersezione (in genere sempre la prima) si chiamerà sfasamento assoluto, diversamente se esso viene calcolato per coppie adiacenti di intersezioni, esso si chiamerà sfasamento relativo.

Formulazione del modello

Per quanto concerne, invece, la formulazione del modello bisogna prima di tutto precisare che nella specificazione della funzione multi-obiettivo considerata sono stati adottati il tempo totale di viaggio impiegato ed il valore medio del consumo. Nella fase preliminare, si è inoltre supposto che tutti veicoli fossero caratterizzati dalla stessa tipologia di alimentazione (elettrica).

In maggior dettaglio il tempo totale di viaggio è calcolato come la somma del numero di veicoli su ciascun arco della rete, durante l'orizzonte di simulazione, moltiplicato per la durata di ciascun sotto-intervallo di simulazione (pari ad 1 secondo). Tuttavia, poiché è necessario considerare una fase di warm-up, ossia di pre-caricamento della rete, chiaramente al fine del calcolo dell'indicatore non si è tenuto conto di questa fase preliminare. L'intervallo di simulazione è in ogni caso pari a 3600 secondi). In aggiunta, è opportuno evidenziare che la durata del sotto-intervallo di simulazione posta pari ad 1 secondo è in ogni caso maggiore del tempo necessario allo scambio di informazioni fra la infrastruttura ed il veicolo e quindi a tenere conto anche della reazione del veicolo.

Definiamo ancora le seguenti grandezze

- t quale sotto-intervallo di simulazione
- T_1 quale durata del periodo iniziale di warm-up
- T quale intervallo di simulazione
- l quale singolo arco all'interno della rete considerata
- n_l quale numero di veicoli sull'arco l
- Δt quale durata del sotto-intervallo di simulazione

Dunque, il tempo totale di viaggio è ottenuto come di seguito:

$$TTS = J_{TTS} = \sum_{t=T_1}^{T_1+T} \sum_{l \in L} n_l \cdot \Delta t \quad (8)$$

In relazione invece all'indicatore relativo alla funzione di consumo è opportuno precisare che è stata considerata la media della funzione di consumo per veicoli elettrici ed è calcolata tenendo conto della velocità dei veicoli su ciascun arco a ciascun sotto-intervallo di simulazione, lungo 200

metri in prossimità della intersezione considerata, relativamente al modello ibrido sopra introdotto, mediante il modello del tipo Cellular Automata.

È opportuno quindi specificare le seguenti variabili:

- $n_{l,t}^{200m}$ ossia il numero di veicoli lungo l'arco l al sotto-intervallo di simulazione t , alla distanza di 200 metri in prossimità della intersezione;
- $v_i^{l,200m}$ la velocità del singolo veicolo i sull'arco l , a 200 metri dalla intersezione espressa in celle/s;
- Δx la lunghezza di ciascuna cella per il modello Cellular Automata;
- $f(v)$ è la funzione di consumo per ciascun veicolo espressa in kWh/km, calcolata a partire dalla velocità espressa a sua volta in km/h;
- $MEC_{l,t}$ è il valore medio della funzione di consumo dei veicoli su ciascun arco e ciascun sotto-intervallo di simulazione;
- MEC_{N,T_1-T} è il valore medio della funzione di consumo dei veicoli all'interno di tutta la rete calcolata nell'intervallo di simulazione escluso il periodo iniziale di warm-up.

Per quanto concerne il valore medio della funzione di consumo dei veicoli su ciascun arco, per ciascun sotto-intervallo di simulazione esso è calcolato come di seguito:

$$MEC_{l,t} = \left(\sum_{i \in V_i^{200m}} f(v_i^{l,200m} \cdot \Delta x \cdot 3.6) \right) / n_{l,t}^{200m} \quad (9)$$

A partire dunque dalla funzione di consumo, descritta successivamente nella Sezione 2.3.2, può essere calcolato il valore medio della funzione di consumo come di seguito MEC_{N,T_1-T} .

$$MEC_{N,T_1-T} = J_{EC} = \frac{\sum_{t=T_1}^{T_1+T} \sum_{l \in L} MEC_{l,t} \cdot n_{l,t}^{200m}}{\sum_{t=T_1}^{T_1+T} \sum_{l \in L} n_{l,t}^{200m}} \quad (10)$$

Nello specifico relativamente al problema della ottimizzazione multi-obiettivo, la soluzione non è univocamente determinata nel senso che non esiste un unico punto che sia in grado di ottimizzare contemporaneamente tutte e due le funzioni obiettivo considerate. Ne consegue dunque che è necessario adottare una trasformazione delle funzioni obiettivo che si basi sulla loro somma pesata, finalizzata a minimizzare la distanza delle due dai valori ottimi possibili per ciascuna delle due funzioni. Ciascun obiettivo è allora trasformato secondo l'approccio *upper-lower-bound* (Koski, 1981; Koski and Silvennoinen, 1987; Rao and Freiheit, 1991; Yang et al., 1994).

Definiamo le seguenti variabili:

x la variabile decisionale

$J_o(x)$ la funzione obiettivo

$J_o^{\min Pareto}$ il minimo valore della funzione obiettivo

$J_o^{\max Pareto} = \max_{1 \leq j \leq k} (J_o(x_j^*))$ il Massimo valore della funzione obiettivo, dove x_j^* rappresenta

il punto che massimizza la j-esima funzione obiettivo (tale che sia il vertice della curva di Pareto e $J_o(\mathbf{x}_j^*)$ è proprio il vertice della curva di Pareto)

La funzione obiettivo, in termini di coordinate di nadir, è quindi ottenuta come di seguito:

$$J_o^{trans} = \frac{J_o(\mathbf{x}) - J_o^{\min Pareto}}{J_o^{\max Pareto} - J_o^{\min Pareto}}$$

E la soluzione scelta sarà quella più al punto di Nadir così come di seguito dettagliato:

$$\min_x U = \min_x \sqrt{J_{TTS}^{trans}(\mathbf{x})^2 + J_{EC}^{trans}(\mathbf{x})^2}$$

Infine, in termini di algoritmo risolutivo è stata adottata una procedura metaeuristica necessaria data la natura non in forma chiusa della funzione obiettivo ed in particolare in questo caso è stato utilizzato il metodo della Differential Evolution (DE; O’Hora et al., 2006; Price, 2013). Non ci sono prove di convergenza per DE, tuttavia è stato dimostrato che è efficace su un'ampia gamma di problemi di ottimizzazione classici. In un confronto di (Storn and Price, 1997) DE è stato più efficiente sia della Simulated Annealing che degli Algoritmi Genetici. (Ali e Törn, 2004) hanno evidenziato che la DE era più accurata ed efficiente della ricerca casuale controllata e di un altro algoritmo genetico. Complessivamente anche (Lampinen e Storn, 2004) hanno dimostrato che DE era più accurata di molti altri metodi di ottimizzazione, inclusa anche la *evolutionary programming*. Nel caso specifico, la DE è stata applicata con la seguente impostazione dei parametri:

- La dimensione della popolazione, variabile a seconda dello scenario applicativo
- La Combination probability fissata pari a 0.90
- il Mutation factor posto pari a $0.50 \cdot (1 + rand)$
- il massimo numero di iterazioni posto pari a 1000

È opportuno effettuare altre due considerazioni integrative. La prima riguarda la possibilità di sostituire le funzioni obiettivo considerate con altre funzioni obiettivo ad esempio potrebbe essere sostituita la funzione di consumo con altri indicatori che siano proxy della stessa come ad esempio il numero degli arresti; la seconda riguarda, in coerenza con la letteratura, di investigare anche il confronto fra i risultati della strategia multi-obiettivo con quelli di funzioni obiettivo del tipo pesato esattamente come viene fatto in strumenti di uso comune come TRANSYT (Robertson, 1969).

2.3.1.2 Ottimizzazione della velocità

Definizione delle variabili

Di seguito vengono introdotte quelle che sono le variabili fondamentali per la formulazione del problema:

- $cell_{length}$ lunghezza della cella all’interno del modello Cellular Automata del modello ibrido, posta pari a 2.5 m;
- $v_{max\ la}$ velocità di flusso libero desiderata del modello Cellular Automata che può assumere i due seguenti valori:

- $base_{speed}$ la velocità di base dei veicoli non connessi, posta uguale a 6 celle/s (15m/s);
- $base_{speed-CAV}$ la velocità di base dei veicoli connessi, in celle /s, che è la variabile che viene ottimizzata e che soddisfa le seguenti condizioni
 - $max_{speed-CAV}$ che è il valore massimo della velocità desiderata per i veicoli connessi nel modello Cellular Automata, espressa in celle /s;
 - $min_{speed-CAV}$ che è il valore minimo della velocità desiderata per i veicoli connessi nel modello Cellular Automata, espressa in celle /s;
- $optimization_{distance}$ distanza dalla intersezione a cui avviene la ottimizzazione, posta pari a 200 metri;
- $green_{time}$ durata della fase di verde dell'accesso di riferimento;
- $last_{cell}$ indice dell'ultima cella alla fine dell'arco (ossia all'accesso) corrente;
- $distance_{to_traffic_light}$ distanza che intercorre fra la attuale posizione del veicolo e la intersezione a valle, in celle;
- $time_{with_desired_speed}$ numero di sotto-intervalli temporali che il veicolo corrente richiede per potere raggiungere la intersezione mantenendo la velocità desiderata di base ($base_{speed-CAV}$);
- $stage_{when_arriving}$ la fase del piano di semaforizzazione che troverà il veicolo una volta arrivato alla intersezione a valle secondo il suo tempo di percorrenza;
- $cycle_{length}$ durata del ciclo posta pari a 90 s;
- $count_{accelerated}$ numero di veicoli che stanno viaggiando ad una velocità superiore alla velocità di base, lungo l'arco di riferimento ed al sotto-intervallo temporale di riferimento;
- $active_{stage}$ ($time_{step}$) è la fase attiva nel sotto-intervallo considerato;
- $slower_{delta_time}$ è il numero di sotto-intervalli maggiore di $time_{with_desired_speed}$, necessario al veicolo connesso per potere raggiungere la intersezione nella fase di verde successiva per l'accesso corrente; con questo valore e questa distanza dalla intersezione, è calcolata la $slower_{speed}$;
- $faster_{delta_time}$ numero di sotto-intervalli inferiori al $time_{with_desired_speed}$, per il veicolo connesso affinché arrivi alla intersezione nella fase di verde durante il ciclo precedente relativo allo $slower_{delta_time}$; con questo valore e la distanza dalla intersezione, è calcolata la $faster_{speed}$.

Formulazione del modello

Per ogni veicolo connesso situato a 200 metri dalla intersezione, viene prima calcolato il numero stimato di passi temporali ($time_{with_desired_speed}$) per l'arrivo del veicolo all'intersezione considerando la distanza da essa ($distance_{to_traffic_light}$), e la velocità di base desiderata ($base_{speed}$). Se il semaforo è verde in tale fase, la velocità desiderata del veicolo non viene modificata; tuttavia, se il semaforo è rosso, viene calcolato lo $slower_{delta_time}$, utilizzando il $time_{with_desired_speed}$ come base, fino a quando il semaforo diventa verde per l'avvicinamento corrente. Quindi, viene calcolato il $faster_{delta_time}$, considerando il valore dello $slower_{delta_time}$, la lunghezza del ciclo, la durata del semaforo, e il numero di veicoli che erano già stati impostati con una velocità desiderata maggiore del valore di base sulla corrente relativa all'accesso considerato.

E' infine opportuno ricordare che in tutta la procedura vengono riapplicate le regole del Cellular Automata ossia a ciascun sotto-intervallo della simulazione e per ciascun veicolo i , data la velocità e la posizione corrente rispettivamente $v_i(t)$ e $x_i(t)$ le quattro regole sono sintetizzate come di seguito:

Slowing down Determinazione del *gap* all'istante t . If **speed** > *gap*, then slow down.

Acceleration If **speed** < *gap* and **speed** < v_{\max} , then accelerate by one.

$$v_i^*(t + 1) = \min(v_i(t) + 1, v_0, g_i)$$

Randomization If **speed** > 0, then with probability p (dawdling probability, è un termine stocastico) reduce it by one.

(Dawdling rule)

$$v_i(t + 1) = \begin{cases} \max(v_i^*(t + 1) - 1) & \text{with probability } p \\ v_i^*(t + 1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Car motion Update the position

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1)$$

2.3.1.3 Modello Integrato: Progettazione semaforica e Ottimizzazione della velocità

Nel caso dell'ottimizzazione combinata, viene formulato un problema di ottimizzazione a due livelli nel quale al primo livello viene attuata la ottimizzazione mono-criterio basata sulla minimizzazione del TTS ed al secondo livello viene attuata la ottimizzazione della velocità mirata alla minimizzazione del consumo di carburante. L'algoritmo risolutivo si basa su una procedura iterativa che mira alla identificazione di soluzioni sub-ottime che siano in grado di soddisfare entrambi i criteri.

2.3.1.4 Considerazioni conclusive

I due framewok, così sviluppati, l'uno basato sulla ottimizzazione multi-criteria l'altro sulla ottimizzazione bilivello, ossia sulla ottimizzazione semaforica mono-criterio e sulla ottimizzazione della velocità al livello inferiore, sono flessibili ad indagini specifiche dell'impatto di tipologie diverse di powertrain, in particolare elettrici e convenzionali, oltre che ad investigare diversi livelli di penetrazione dei veicoli connessi. E' opportuno evidenziare che la analisi dell'impatto dei diversi livelli di connessione riguarda principalmente la ottimizzazione ed il controllo dunque della velocità. Infatti, il ruolo del veicolo connesso è quello di fornire una stima dello stato del flusso veicolare più accurata giocando esso da veicolo sonda, questo impatto è però stimabile solo in contesti reali o comunque in accoppiamento con modelli per la stima dello stato del sistema in tempo reale (plant model); diversamente lo stato del sistema è propriamente definito mediante modelli ed in maniera più generica gli approcci adottati ci riconducono a contesti nei quali è come se ci fossero sempre veicoli connessi.

2.3.2 Modulo per il consumo dei veicoli elettrici

Il quadro metodologico proposto in questo lavoro per il modulo dei consumi è mostrato nella Figura 4.

Lo strumento di estrazione delle traiettorie sviluppato, il *Trajectories Extraction Tool for Traffic Control Systems Applications* (TET-TCSA), permette di estrarre porzioni di dati microscopici delle

traiettorie - cioè i dati GPS e di potenza dei singoli veicoli - su una determinata area/porzione della rete (ad esempio in presenza di sistemi di controllo del traffico, sezioni stradali critiche, rotonde ecc.) Le traiettorie estratte vengono poi utilizzate per calibrare il VT-CPEM (Fiori et al., 2016). Il modello viene quindi applicato per simulare il consumo microscopico di energia degli EV e per stimare una funzione di consumo energetico macroscopico. Tale funzione descrive la relazione matematica tra il consumo di energia e la velocità media del veicolo in una specifica condizione, e può essere utilizzata per integrare la funzione obiettivo nella progettazione della strategia di controllo del traffico.

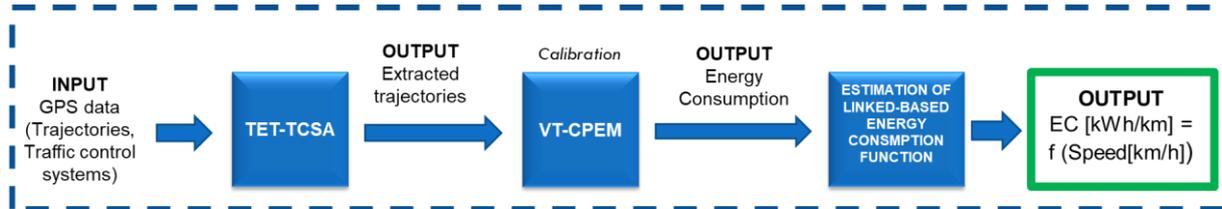


Figura 4. Framework metodologico del modulo relativo al consumo del veicolo elettrico

2.3.3 Estrazione traiettorie: Trajectories Extraction Tool for Traffic Control Systems Applications (TET-TCSA)

Lo strumento è stato sviluppato per estrarre, da un grande dataset di traiettorie, porzioni di traiettorie di veicoli che attraversano un'area specifica della rete di interesse.

In questo lavoro, lo strumento viene applicato per estrarre porzioni di traiettorie individuali nelle vicinanze di due sistemi di controllo del traffico consecutivi/interagenti (500 m prima e dopo ogni intersezione). Lo strumento è sviluppato in ambiente MATLAB R2019b per essere facilmente integrato con altri modelli/software.

In particolare, lo strumento di estrazione TET-TCSA prende come dati di input: (i) traiettorie GPS e dati di potenza (timestamp, latitudine, longitudine, tensione e corrente) e (ii) posizione dei sistemi di controllo (lat, lon); e fornisce come output: (i) porzione di traiettorie in un range specifico dei sistemi di controllo (es. +/- 500 m) e (ii) statistiche descrittive sulle traiettorie che permettono di raggruppare i comportamenti dei conducenti (es. stagionale, settimanale, orario).

In Figura 5 e Figura 6 sono riportati esempi di traiettorie estratte in due intersezioni semaforizzate consecutive/interagenti.

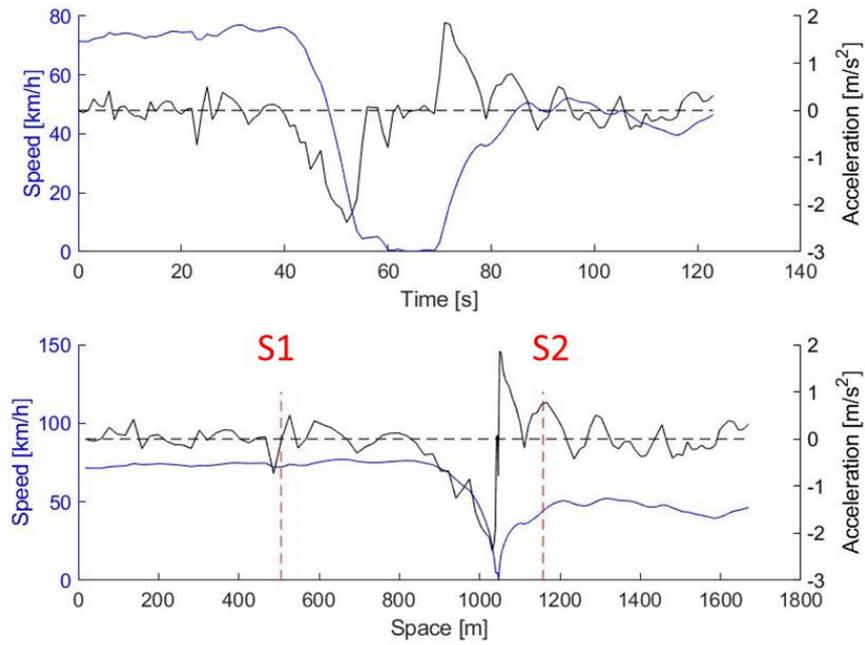


Figura 5. Esempio di traiettoria estratta che coinvolge due sistemi di controllo. La linea nera rappresenta l'accelerazione, la linea blu la velocità, le linee rosse tratteggiate rappresentano il primo (S1) ed il secondo (S2) sistema di controllo del traffico

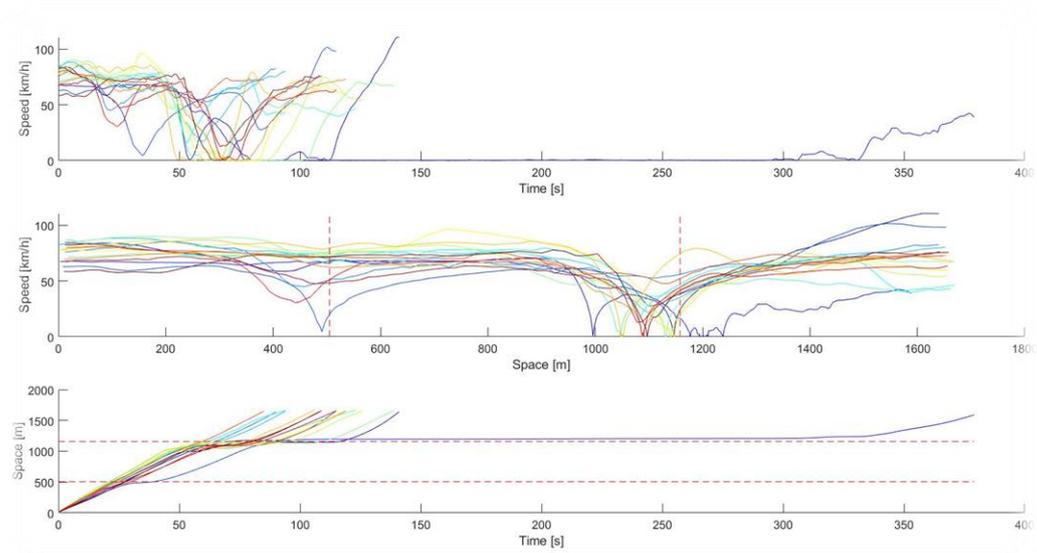


Figura 6. Esempio di un insieme traiettorie estratte, sullo stesso percorso, che coinvolgono due sistemi di controllo consecutivi. Le linee rosse tratteggiate rappresentano il primo (S1) e il secondo (S2) sistema di controllo del traffico

2.3.3.1 Ri-calibrazione modello consumo

In un'integrazione con una strategia di controllo del traffico, ci si aspetta che il consumo di energia entri nella funzione obiettivo insieme alla funzione di ritardo e ad altre misure di performance su cui è progettata la strategia di controllo. Per ottenere questo obiettivo, è stato utilizzato un modello di consumo energetico per simulare i consumi dei veicoli elettrici in prossimità delle intersezioni. In questo lavoro, è stato adottato il VT-CPEM, come precedentemente specificato. In particolare, i parametri del modello sono calibrati rispetto ai dati di traiettoria estratti i cui dettagli sono riportati di seguito.

Dataset statistics

Il set di dati è composto da 12 traiettorie raccolte dal GPS e dal CAN bus del EV testato. Questi dati includono la potenza istantanea richiesta per la trazione e per questo motivo è stato possibile procedere alla calibrazione con il modello VT-CPEM.

Dati statistici riassuntivi dei parametri cinematici e del consumo/recupero di energia del dataset sono riportati nella Tabella 1.

Tabella 1. Statistiche riassuntive per il set di dati delle traiettorie adottato per la calibrazione

distance [km]	mean	1,284
	<i>std dvn</i>	0,021
duration [s]	mean	77,583
	<i>std dvn</i>	20,118
average speed [km/h]	mean	62,152
	<i>std dvn</i>	13,465
maximum speed [km/h]	mean	82,743
	<i>std dvn</i>	8,905
max acceleration [m/s²]	mean	1,146
	<i>std dvn</i>	0,609
max deceleration [m/s²]	mean	-2,188
	<i>std dvn</i>	1,029
average slope [%]	mean	0,002
	<i>std dvn</i>	0,003
energy consumption [kWh/km]	mean	0,096
	<i>std dvn</i>	0,020
energy recovered [kWh/km]	mean	-0,053
	<i>std dvn</i>	0,017

Calibrazione: Setup

Il set di dati è stato elaborato per consentire la calibrazione del VT-CPEM e per includere il consumo di energia in una strategia di controllo del traffico per i veicoli elettrici. Nella procedura di calibrazione come funzione obiettivo è stata adottata una relazione tra la potenza di trazione totale osservata ($P_{T\text{trip}}^{obs}$) istantanea, in ogni viaggio, con la potenza di trazione istantanea simulata

dal modello ($P_{T_{trip}}^{sim}$) e data dall'equazione (8).

Quattro parametri sono stati calibrati: i tre parametri di efficienza ($\eta_{BAT}, \eta_{DL}, \eta_{EM}$) e il parametro α che entra nell'efficienza energetica della frenata rigenerativa (η_{RB}) attraverso l'equazione (7).

La funzione obiettivo da minimizzare per la stima dei parametri è la somma, tra i viaggi, della radice quadrata degli errori quadratici medi (Sum of RMSE) tra la potenza di trazione $P_{T_{trip}}^{obs}$ osservata e quella simulata $P_{T_{trip}}^{sim}$ in ogni secondo del viaggio.

$$F(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{trip=1}^{N_{trips}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{T_{trip}} [P_{T_{trip}}^{sim}(i, \boldsymbol{\beta}) - P_{T_{trip}}^{obs}(i)]^2}{T_{trip}}} \tag{11}$$

I dati di traiettoria estratti si riferiscono allo stesso veicolo. Per questo motivo, un singolo vettore di quattro parametri $\boldsymbol{\beta}^*$ è stato stimato per l'intero numero di viaggi, ottenendo quanto segue:

$$\boldsymbol{\beta}^* = \underset{\boldsymbol{\beta} \in S_{\boldsymbol{\beta}}}{\operatorname{argmin}} F(\boldsymbol{\beta}) \tag{12}$$

I problemi di ottimizzazione (8)-(9) sono stati risolti per mezzo di un algoritmo genetico (GA). Questo metodo ha dimostrato di avere maggiori possibilità di trovare la soluzione di ottimo globale nel problema di ottimizzazione rispetto agli approcci basati sul gradiente in caso di modelli altamente non lineari. Il GA è stato impostato con una popolazione iniziale di 1000 e un numero di generazioni pari a 100, per aumentare la copertura del dominio dei parametri e per ottenere una maggiore possibilità di individuare l'ottimo globale (Holland e Goldberg, 1989; Storn, 1996). I tempi di stima corrispondenti a questo setup GA erano comunque soddisfacenti.

In termini di dominio di ottimizzazione, i limiti superiori/inferiori per i parametri da stimare sono stati fissati come illustrato nella Tabella 2. In particolare, i limiti superiori e inferiori per i tre parametri di efficienza ($\eta_{BAT}, \eta_{DL}, \eta_{EM}$) sono stati identificati secondo la letteratura di riferimento (Hayes et al., 2011; Helms et al., 2010; Tie e Tan, 2013; Waide e Brunner, 2011), mentre il parametro α nell'equazione (7) per l'efficienza del recupero di energia in frenata (η_{RB}) è stato vincolato nell'intervallo [0.005-1] come illustrato nella Sezione 2.1.1.

Tabella 2. Limiti superiori e inferiori dei parametri calibrati

	η_{EM}	α	η_{BATT}	η_{DL}
Lower bound	0.90	0.005	0.90	0.90
Upper bound	0.98	1	0.98	0.98

Calibrazione: Risultati

Nella Tabella 3 sono riportati i risultati della calibrazione dei parametri del VT-CPEM seguendo

l'approccio descritto nella sezione precedente.

Tabella 3. Valori dei parametri calibrati

η_{EM}	α	η_{BATT}	η_{DL}
0.979	0.079	0.955	0.969

Inoltre, l'errore percentuale, tra i valori medi del consumo totale di energia simulato e osservato è riportato nella Tabella 4.

Tabella 4. Impatto sul consumo energetico

		Observed	Simulated	PE [%]
Energy consumption [kWh/km]	<i>mean</i>	0.096	0.094	-2.1%
Energy recovered [kWh/km]	<i>mean</i>	-0.053	-0.052	-1.9%

2.3.3.2 Funzione di consumo energetico vs. velocità

Eseguendo il modello in un framework quasi-Monte Carlo, viene stimata una funzione macroscopica di consumo di energia sulla porzione di rete di interesse. In particolare, la relazione tra la velocità media su una piccola porzione del segmento stradale e il consumo medio di energia è calcolata sulla base del consumo microscopico di energia simulato attraverso il VT-CPEM ri-calibrato.

Le traiettorie estratte sono state suddivise casualmente in segmenti elementari lunghi 50 m. Il campionamento casuale è stato eseguito con un approccio quasi-Monte Carlo per mezzo della sequenza Sobol (Sobol, 1976). Tale procedura ha consentito di generare molti segmenti elementari a partire dall'intero database delle traiettorie. Ogni segmento elementare è stato associato ad una velocità media e ad una corrispondente distribuzione del consumo di energia del veicolo elettrico, da cui è stata stimata la funzione.

I dati simulati e i risultati del fitting polinomiale sono riportati rispettivamente nella Figura 7 e nella Tabella 5.

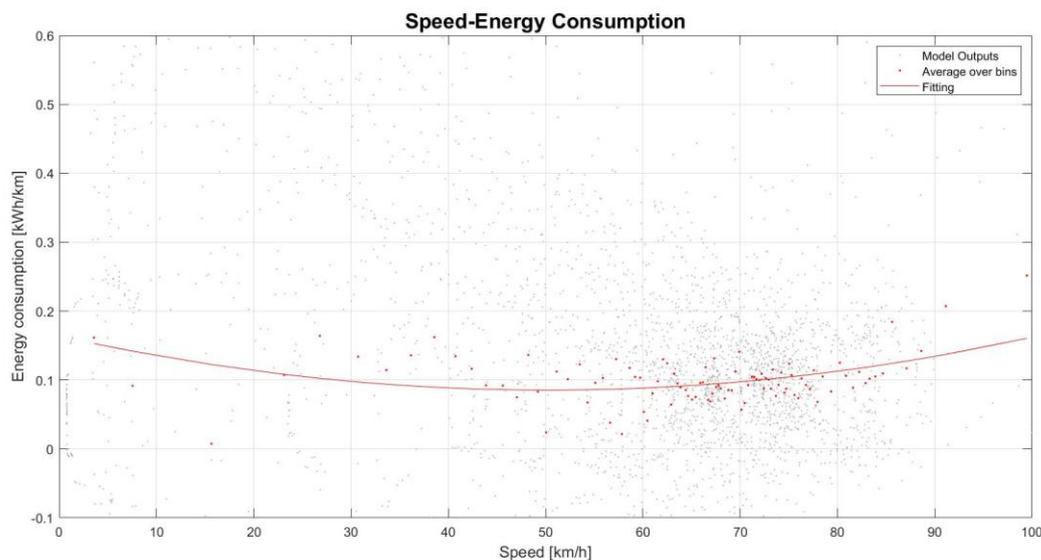


Figura 7. Relazione tra il consumo di energia e la velocità per il powertrain analizzato

Tabella 5. Fitting dei dati per il powertrain analizzato

$f(x) = p1 \cdot x^2 + p2 \cdot x + p3$	Coefficients
EV	<p>p1 = 3.102e-05</p> <p>p2 = -0.003117</p> <p>p3 = 0.1636</p>

3 Conclusioni e sviluppi futuri

L’obiettivo di questo report è quello di illustrare le attività condotte in questo primo anno di collaborazione con ENEA nel Piano Triennale di Realizzazione (PTR) 2019-2021 del progetto Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali.

Sono state riportate in dettaglio analisi di letteratura effettuate con lo scopo di individuare le metodologie più adatte allo sviluppo del framework integrato proposto.

Nello specifico, è stato presentato un quadro metodologico per supportare la progettazione della strategia di controllo di intersezioni semaforizzate in presenza di veicoli elettrici. Inoltre, è stata stimata una funzione di consumo energetico macroscopico basata su un modello microscopico, il VT-CPEM. Il modello è stato calibrato su dati reali di traiettoria e potenza raccolti nei pressi di due intersezioni semaforizzate. In particolare, è stato sviluppato uno strumento dedicato (TET-TCSA) per estrarre, da un ampio dataset, i dati delle traiettorie individuali che includono l'area di interesse della rete. Lo strumento è stato integrato con il modello microscopico di consumo energetico e i dati estratti sono utilizzati nella procedura di calibrazione.

I risultati della calibrazione mostrano un errore, in termini di errore percentuale tra il consumo di energia simulato e osservato, pari a circa il 2%.

Il modello calibrato è stato eseguito in un framework quasi-Monte Carlo per simulare il consumo di energia microscopico del singolo veicolo, che ha permesso la stima della relazione macroscopica tra consumo di energia e velocità per l’applicazione di interesse.

Per sviluppare il framework modellistico integrato proposto, la funzione consumo-velocità stimata è integrata in una strategia di progettazione del controllo del traffico, come un termine complementare nella funzione obiettivo. Il design del framework integrato sviluppato è stato descritto nel report.

La prospettiva di ricerca futura di tale studio è quella di applicare il framework integrato proposto a specifiche configurazioni di rete e di realizzare un confronto tra veicoli elettrici e convenzionali. Inoltre, un confronto tra veicoli a guida autonoma CAV (Connected and Autonomous Vehicles) sarà oggetto del report relativo al secondo anno.

4 Riferimenti bibliografici

Abdel-Aty, M., Dilmore, J., & Dhindsa, A. (2006). Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement. *Accident analysis & prevention*, 38(2), 335-345.

Akcelik R. (1988). The Highway Capacity Manual delay formula for signalized intersections. *ITE Journal*, pp. 23-27.

Akcelik R., Besley M., (1992). *SIDRA user guide, Part 2, Paper 143*, Transport Research Ltd, Victoria, Australia.

- Al Islam, S. B., & Hajbabaie, A. (2017). Distributed coordinated signal timing optimization in connected transportation networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80, 272-285.
- Allsop R.E. (1974) Some possibilities for using traffic control to influence trip distribution and route choice. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Transportation and Traffic Theory* (Buckley D.J. ed). New York Elsevier, pp. 345-373.
- Allsop, R. E. (1971). SIGSET: A computer program for calculating traffic signal settings. *Traffic Engineering & Control*.
- Allsop, R.E. (1976). SIGCAP: A computer program for assessing the traffic capacity of signal-controlled road junctions. *Traffic Engineering & Control* 17, pp. 338-341.
- Almutairi, F., Yang, H., & Rakha, H. (2017). Eco-cooperative adaptive cruise control at multiple signalized intersections: Network-wide evaluation and sensitivity analysis. *2017 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 520–525.
- ASADI, C. G., & Vahidi, A. (2011). Phase Tuning in Synchronization of Nonlinear Master-slave Oscillating Systems Using Decomposition Method.
- Aziz, H.M.A., Ukkusuri, S.V., 2012. Integration of environmental objectives in a system optimal dynamic traffic assignment model. Available at: *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 27 (7), 494–511.
- Beak, B., Head, K. L., & Feng, Y. (2017). Adaptive coordination based on connected vehicle technology. *Transportation Research Record*, 2619(1), 1-12.;
- Bretherton et al., (2005). SCOOT: Managing congestion, communications and control. TRRL, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK.
- 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*.
- Burrow I.J. (1987). OSCADY: a computer program to model capacities, queues and delays at isolated traffic signal junctions. TRRL Report, Vol. 105, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK.
- Camus R. (1992). A Traffic Coordination Model for Urban Signalized Network Design. *Proceedings of the First Meeting of the EURO Working Group on Urban Traffic and Transportation*, Landshut, Germany.
- Cantarella G.E., Antonino Vitetta (2010). *La regolazione semaforica di intersezioni stradali: metodi ed applicazioni*. Franco Angeli Editore.
- Cantarella G.E., Improta G. (1988). Capacity Factor and Cycle Time Optimization for Signalized Junctions: A Graph Theory Approach. *Transportation Research* 22B, pp. 1-23.
- Cantarella, Giulio E., de Luca, S., Di Pace, R., & Memoli, S. (2015). Network Signal Setting Design: Meta-heuristic optimisation methods. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 24–45.
- Cantarella, Giulio Erberto, de Luca, S., Di Pace, R., & Memoli, S. (2014). Signal setting design at a single junction through the application of genetic algorithms. In *Computer-based Modelling and Optimization in Transportation* (pp. 321–331). Springer.
- Chan, C. C., & Wong, Y. S. (2004). Electric vehicles charge forward. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2(6), 24–33.
- Chan, Ching Chue. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704–718.
- Daganzo, C.F. (1994). *The cell-transmission model. Part 2: Network traffic*, University of California, Berkeley, California.

- 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 Gangi, M., Cantarella, G. E., Di Pace, R., & Memoli, S. (2016). Network traffic control based on a mesoscopic dynamic flow model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 66, 3–26.
- Di Pace, R. (2020). A traffic control framework for urban networks based on within-day dynamic traffic flow models. *Transportmetrica A: Transport Science*, 16(2), 234-269.
- Doucette, R. T., & McCulloch, M. D. (2011). Modeling the CO2 emissions from battery electric vehicles given the power generation mixes of different countries. *Energy Policy*, 39(2), 803–811.
- Dresner, K., & Stone, P. (2004, July). Multiagent traffic management: A reservation-based intersection control mechanism. In *Autonomous Agents and Multiagent Systems, International Joint Conference on* (Vol. 3, pp. 530-537). IEEE Computer Society.;
- Dresner, K., & Stone, P. (2005, July). Multiagent traffic management: An improved intersection control mechanism. In *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems* (pp. 471-477).
- EC. (2011). *White Paper on Transport: Roadmap to a Single European Transport Area—towards a Competitive and Resource-efficient Transport System*. Publications Office of the European Union.
- Edwardes, W., & Rakha, H. (2014). Virginia tech comprehensive power-based fuel consumption model: Modeling diesel and hybrid buses. *Transportation Research Record*, 2428(1), 1–9.
- Fayazi, A., Lee, K., Caverlee, J., & Squicciarini, A. (2015, August). Uncovering crowdsourced manipulation of online reviews. In *Proceedings of the 38th international ACM SIGIR conference on research and development in information retrieval* (pp. 233-242).
- Feng, Y., Head, K. L., Khoshmagham, S., & 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., Yu, C., & Liu, H. X. (2018). Spatiotemporal intersection control in a connected and automated vehicle environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89, 364-383.
- 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. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 65, 658–673.
- Fiori, C., Ahn, K., & Rakha, H. A. (2016). Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. *Applied Energy*, 168, 257–268.
- 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. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 275–290.
- Fiori, Marzano, Punzo, & Montanino. (2020). Energy consumption modelling in presence of uncertainty. 10.1109/TITS.2020.2991270
- Foley, A., Tyther, B., Calnan, P., & Gallachóir, B. Ó. (2013). Impacts of electric vehicle charging under electricity market operations. *Applied Energy*, 101, 93–102.
- Gao, D. W., Mi, C., & Emadi, A. (2007). Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 729–745.

- Gartner, N., 1983. OPAC: a demand-responsive strategy for traffic signal control. *Transportation Research Record* 906, 75–81.
- Gazis, D.C., 1964. Optimal control of a system of oversaturated intersections. *Operations Research* 12, 815±831.
- Goodall, N. J. (2014). Machine ethics and automated vehicles. In *Road vehicle automation* (pp. 93-102). Springer, Cham.
- Goodall, N. J., Smith, B. L., & Park, B. (2013). Traffic signal control with connected vehicles. *Transportation Research Record*, 2381(1), 65-72.
- Hayes, J. G., De Oliveira, R. P. R., Vaughan, S., & Egan, M. G. (2011). Simplified electric vehicle power train models and range estimation. *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1–5.
- He, J., & Hou, Z. (2012). Ant colony algorithm for traffic signal timing optimization. *Advances in Engineering Software*, 43(1), 14-18.;
- He, Q., Head, K. L., & Ding, J. (2014). Multi-modal traffic signal control with priority, signal actuation and coordination. *Transportation research part C: emerging technologies*, 46, 65-82.
- 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. *18th International Symposium Transport and Air Pollution*, 5, 113–124.
- Holland, J. H., & Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Massachusetts: Addison-Wesley.
- Hom Chaudhuri, B., Vinod, A. P., & Oishi, M. M. (2017, May). Computation of forward stochastic reach sets: Application to stochastic, dynamic obstacle avoidance. In *2017 American Control Conference (ACC)* (pp. 4404-4411). IEEE.
- Horn, J. and Nafpliotis, N. (1994). *Multiobjective Optimization Using The Niche Pareto Genetic Algorithm*, Illinois Genetic Algorithms Laboratory, University of Illinois, Urbana, Champaign.
- Hunt P. B. Robertson D. I: Breterthon R D Winton R I (1981) SCOOT A traffic responsive method of coordinating signals. Depart. Of Transport TRRL Report No. LR 1014. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK
- Improta G., Cantarella G.E., 1984. Control systems design for an individual signalised junction. *Transportation Research* 18B, pp. 147-167.
- Jiang, Y., Zanon, M., Hult, R., & Houska, B. (2017). Distributed algorithm for optimal vehicle coordination at traffic intersections. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 11577-11582.
- Jimenez, F., Aparicio, F., & Paez, J. (2008). Evaluation of in-vehicle dynamic speed assistance in Spain: algorithm and driver behaviour. *IET Intelligent Transport Systems*, 2(2), 132-142.
- Kamal, M. A. S., Mukai, M., Murata, J., & Kawabe, T. (2011). Ecological vehicle control on roads with up-down slopes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(3), 783–794. doi:10.1109/TITS.2011.2112648
- Kamalanathsharma, R. K., Rakha, H. A., & Yang, H. (2015). Networkwide impacts of vehicle ecospeed control in the vicinity of traffic signalized intersections. *Transportation Research Record*, 2503(1), 91–99.
- Kamalanathsharma, R. K., Rakha, H. A., & Yang, H. (2015). Networkwide impacts of vehicle ecospeed control in the vicinity of traffic signalized intersections. *Transportation Research Record*, 2503(1), 91-99.
- Katsaros, K., Kernchen, R., Dianati, M. & Rieck, D. (2011), Performance Study of a Green Light Optimized Speed Advisory (Glosa) Application Using an Integrated Cooperative Its Simulation

- Platform, Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International, pp. 918-923
- Khondaker, B., & Kattan, L. (2015). Variable speed limit: an overview. *Transportation Letters*, 7(5), 264-278.
- Kim, N., Rousseau, A., & Rask, E. (2012). Autonomie model validation with test data for 2010 Toyota Prius. SAE Technical Paper.
- Koukoumidis, E., Martonosi, M., & Peh, L. S. (2011). Leveraging smartphone cameras for collaborative road advisories. *IEEE Transactions on mobile computing*, 11(5), 707-723.
- 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.
- Lee, J., Park, B. B., Malakorn, K., & So, J. J. (2013). Sustainability assessments of cooperative vehicle intersection control at an urban corridor. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 32, 193-206.
- Levinson, R., Pan, H., Ban-Weiss, G., Rosado, P., Paolini, R., & Akbari, H. (2011). Potential benefits of solar reflective car shells: Cooler cabins, fuel savings and emission reductions. *Applied Energy*, 88(12), 4343-4357.
- Lewis, A. M., Kelly, J. C., & Keoleian, G. A. (2012). Evaluating the life cycle greenhouse gas emissions from a lightweight plug-in hybrid electric vehicle in a regional context. 2012 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST), 1-6.
- Lewis, A. M., Kelly, J. C., & Keoleian, G. A. (2014). Vehicle lightweighting vs. electrification: Life cycle energy and GHG emissions results for diverse powertrain vehicles. *Applied Energy*, 126, 13-20.
- 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. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 7(1), 49-58.
- 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. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 7(1), 49-58.
- 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. (2019). 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. (2019). Multi-objective optimal predictive control of signals in urban traffic network. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23(4), 370-388.
- Little, J.D.C. (1966) The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming. *Operations Research*, 14, pp. 568-594
- Little, J.D.C., Kelson, M.D., Gartner, N.H., 1981. MAXBAND: a program for setting signals on arterials and triangular networks. *Transportation Research Record* 795, 40-46.
- Luo, Y., Li, S., Zhang, S., Qin, Z., & Li, K. (2017). Green light optimal speed advisory for hybrid electric vehicles. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 87, 30-44.
- Ma, J., Li, X., Zhou, F., Hu, J., Park, B., 2016. Parsimonious shooting heuristic for trajectory design of connected automated traffic part II: Computational issues and optimization. *Transp. Res. Part B*
- Mandava, S., Boriboonsomsin, K., & Barth, M. (2009, October). Arterial velocity planning based on traffic signal information under light traffic conditions. In 2009 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (pp. 1-6). IEEE.

- Markel, T., Bennion, K., Kramer, W., Bryan, J., & Giedd, J. (2009). Field testing plug-in hybrid electric vehicles with charge control technology in the Xcel Energy territory. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Mauro V., Di Taranto C. (1989): "UTOPIA", Symposium on Control, Computers and Communications in Transportation.
- Memoli, S., Cantarella, G. E., de Luca, S., & Di Pace, R. (2017). Network signal setting design with stage sequence optimisation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 100, 20-42.
- Michalopoulos, P.G., Stephanopolos, G., 1978. Optimal control of oversaturated intersections: theoretical and practical considerations. *Traffic Engineering and Control*, 216–221.
- Morsink, P. L., van Nes, N., Walta, L., & Marchau, V. (2008). In-car speed assistance to improve speed management. In 15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America's 2008 Annual MeetingITS AmericaERTICOITS JapanTransCore.
- Myhrberg, S. (2008). Saving fuel and environment with intelligent speed adaptation. In 15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America's 2008 Annual MeetingITS AmericaERTICOITS JapanTransCore.
- 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.
- Omar, N., Fleurbaey, K., Kurtulus, C., Van den Bossche, P., Coosemans, T., & Van Mierlo, J. (2013). SuperLIB Project–Analysis of the Performances of the Hybrid Lithium HE-HP Architecture For Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 6(2), 259–268.
- Othman, B., De Nunzio, G., Di Domenico, D., & Canudas-de-Wit, C. (2019). Ecological traffic management: A review of the modeling and control strategies for improving environmental sustainability of road transportation. *Annual Reviews in Control*, 48, 292–311.
<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.09.003>
- Papageorgiou M. (1991). *Concise Encyclopaedia of Traffic and Transportation*. Pergamon Press.
- Papageorgiou M., Diakaki C., Dinopoulou V., Kotsialos A., Wang Y. (2003) Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, 91 (12), pp. 2043-2067.
- Park, S., Rakha, H., Ahn, K., & Moran, K. (2013). Virginia Tech comprehensive power-based fuel consumption model (VT-CPFM): Model validation and calibration considerations. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2(4), 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. *Applied Energy*, 177, 661–670.
- Post, K., Kent, J. H., Tomlin, J., & Carruthers, N. (1984). Fuel consumption and emission modelling by power demand and a comparison with other models. *Transportation Research Part A: General*, 18(3), 191–213.
- 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.
- Qi, X., Wu, G., Hao, P., Boriboonsomsin, K., & Barth, M. J. (2017). Integrated-connected eco-driving system for phev with co-optimization of vehicle dynamics and powertrain operations. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2(1), 2-13.
- Rakha, H., & Kamalanathsharma, R. K. (2011, October). Eco-driving at signalized intersections using V2I communication. In 2011 14th international IEEE conference on intelligent transportation systems (ITSC) (pp. 341-346). IEEE.

- Robertson, D.I., 1969. TRANSYT: a traffic network study tool. RRL Report LR 253, Road Research Laboratory, England.
- Saint Pierre, G., & Ehrlich, J. (2008, November). Impact of intelligent speed adaptation systems on fuel consumption and driver behaviour. In Proceedings of the 15th ITS World Congress. New York: ITS America, ITS Japan, ERTICO.
- Smulders, S. (1990). Control of freeway traffic flow by variable speed signs. *Transportation Research Part B: Methodological*, 24(2), 111-132.
- Sobol, I. M. (1976). Uniformly distributed sequences with an additional uniform property. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 16(5), 236–242.
- Spyropoulou, I., Penttinen, M., Karlaftis, M., Vaa, T., & Golias, J. (2008). ITS solutions and accident risks: Prospective and limitations. *Transport reviews*, 28(5), 549-572
- Stebbins, S., Hickman, M., Kim, J., & Vu, H. L. (2017, January). Balancing computational requirements with performance in model predictive traffic control. In Australasian Transport Research Forum (ATRF), 39th, 2017, Auckland, New Zealand.
- 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. *Transportation Research Record*, 2128(1), 105-113.
- Storani, F. (2021) Innovative Traffic Flow Modelling Tools for Advanced Urban Traffic Control. PhD Thesis.
- Storn, R. (1996). On the usage of differential evolution for function optimization. *Fuzzy Information Processing Society*, 1996. NAFIPS., 1996 Biennial Conference of the North American, 519–523.
- Sturm, P. J., Kirchwegger, G., Hausberger, S., & Almbauer, R. A. (1998). Instantaneous emission data and their use in estimating road traffic emissions. *International Journal of Vehicle Design*, 20(1–4), 181–191.
- Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 82–102.
- Tielert, T., Killat, M., Hartenstein, H., Luz, R., Hausberger, S., & Benz, T. (2010, November). The impact of traffic-light-to-vehicle communication on fuel consumption and emissions. In 2010 Internet of Things (IOT) (pp. 1-8). IEEE.
- Treiber, M., & Kesting, A. (2014, October). Automatic and efficient driving strategies while approaching a traffic light. In 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) (pp. 1122-1128). IEEE.
- Ubiergo, G. A., & Jin, W. L. (2016). Mobility and environment improvement of signalized networks through Vehicle-to-Infrastructure (V2I) communications. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 68, 70-82.
- Van Katwijk, R. T., & Gabriel, S. (2015). Optimising a vehicle's approach towards an adaptively controlled intersection. *IET Intelligent Transport Systems*, 9(5), 479-487.
- Waide, P., & Brunner, C. U. (2011). Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems.
- Wan, N., Vahidi, A., & Luckow, A. (2016). Optimal speed advisory for connected vehicles in arterial roads and the impact on mixed traffic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 69, 548-563.
- Wang, T., Cao, J., & Hussain, A. (2021). Adaptive Traffic Signal Control for large-scale scenario with Cooperative Group-based Multi-agent reinforcement learning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 125, 103046.

- Webster F.W. (1958). Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper 39, Road Research Laboratory, HMSO, London.
- Webster F.W., Cobbe B.M. (1966). Traffic Signals. Road Research Technical Paper 56, Road Research Laboratory, HMSO, London.
- 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 Transactions on Vehicular Technology*, 48(6), 1751–1761.
- Wu, X., Freese, D., Cabrera, A., & Kitch, W. A. (2015). Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 52–67.
- Xia, H., Boriboonsomsin, K., & Barth, M. (2013). Dynamic eco-driving for signalized arterial corridors and its indirect network-wide energy/emissions benefits. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 17(1), 31–41.
- Xia, H., Boriboonsomsin, K., Schweizer, F., Winckler, A. (2012). Field operational testing of ECO-approach technology at a fixed-time signalized intersection. In *2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, (pp. 188–193).
- Xu, B., Ban, X. J., Bian, Y., Li, W., Wang, J., Li, S. E., & Li, K. (2018). Cooperative method of traffic signal optimization and speed control of connected vehicles at isolated intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(4), 1390-1403.
- Xu, B., Li, S. E., Bian, Y., Li, S., Ban, X. J., Wang, J., & Li, K. (2018). Distributed conflict-free cooperation for multiple connected vehicles at unsignalized intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93, 322-334.
- 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.
- Zegeye, S. K., De Schutter, B., Hellendoorn, H., & Breunese, E. (2009, June). Reduction of travel times and traffic emissions using model predictive control. In *2009 American Control Conference* (pp. 5392-5397). IEEE.
- 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. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 31, 158-171.
- Zhang, R., & Yao, E. (2015a). Eco-driving at signalised intersections for electric vehicles. *IET Intelligent Transport Systems*, 9(5), 488–497.
- Zhang, R., & Yao, E. (2015b). Electric vehicles' energy consumption estimation with real driving condition data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 177–187.
- Zhao, X., Spall, J.C., 2018. A markovian framework for modeling dynamic network traffic. In: *2018 Annual American Control Conference*. ACC. Milwaukee, WI. pp. 6616–6621.
- 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., Lo, H. K., & Lin, H. Z. (2013). Delay and emissions modelling for signalised intersections. *Transportmetrica B: transport dynamics*, 1(2), 111-135.
- Zitzler E. et al. (2001). Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Switzerland.
- Zohdy, I. H., & Rakha, H. A. (2016). Intersection management via vehicle connectivity: The intersection cooperative adaptive cruise control system concept. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 20(1), 17-32.

5 Abbreviazioni ed acronimi

CA: Cellular Automata

CTM: Cell Transmission Model

CAV: Connected and Automated 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

6 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/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 ricercatrice (tenure-track) 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. È abilitata a docente di prima e seconda 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 Sezione Italia IEEE WIE AG. Fa parte del comitato editoriale di Transportation Systems Modeling - Frontiers in Future Transportation, Journal of Advanced Transportation, Mathematical problems in Engineering and Sustainability in Environment. Nel 2007 è stata visiting PhD Student presso la TUDelft University; nel 2012 è stata visiting researcher presso il Mobility Depart. del LISER (Lussemburgo). 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. Partecipa infine a numerosi progetti di ricerca sia a livello internazionale (COST) che nazionale (PON- POR-PRIN). 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, Paesi 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.