

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
Orientamento: Infrastrutture di trasporto



Servizio C-ITS Glosa (Green Light Optimized
Speed Advisory): valutazione degli impatti sulla
mobilità in diversi scenari di intersezione

Relatore: Prof. Luca STUDER

Tesi di laurea di:
Elisa GIBILLINI
Matr. n. 905634

Anno accademico 2019/2020

SOMMARIO

Ringraziamenti	2
Sommario.....	4
Abstract	6
Abstract	8
1 Introduzione.....	10
1.1 Problematica affrontate.....	13
1.2 Obiettivo della tesi	15
1.3 Composizione dei capitoli	17
2 Comunicazione tra veicolo e infrastruttura, V2I	18
2.1 Sviluppo dei dispositivi per la comunicazione, Intelligent Transportation.....	18
Systems (ITS).....	18
2.2 Sistema GLOSA, Green Light Optimized Speed Advisory	21
2.3 Impianto di comunicazione tra semaforo e veicolo	22
3 Software di simulazione del traffico.....	26
3.1 Software di simulazione VISSIM	26
3.1.1 Criteri di valutazione.....	28
3.2 Software di programmazione Python	30
4 Stato dell'Arte	32
4.1 Studi relativi ad un singolo incrocio.....	33
4.2 Studi relativi ad incroci multipli in successione.....	34
4.3 Applicazioni esistenti	36
4.4 Innovazione nella ricerca	38
5 Elementi costitutivi della simulazione	40
5.1 Classificazione incroci	40
5.2 Simulazione tramite il software VISSIM	43
5.2.1 Studio del flusso veicolare	44
5.2.2 Configurazione della rete stradale.....	45
5.2.3 Definizione dello stile di guida.....	45
5.2.4 Analisi della velocità	46
5.2.5 Descrizione del ciclo semaforico.....	47
5.3 Utilizzo del linguaggio di programmazione Python	48

6 Formulazione degli scenari	50
6.1 Intersezione con una corsia.....	53
6.2 Intersezione con due corsie.....	55
6.3 Analisi degli incroci non idonei.....	56
7 Risultati ottenuti	60
7.1 Risultati per intersezioni a una corsia.....	64
7.1.1 Confronto con scenari aggiunti.....	69
7.2 Risultati per intersezioni a due corsie.....	73
7.2.1 Confronto con scenari aggiunti.....	80
8 Conclusioni	84
8.1 Lavori futuri	86
Bibliografia.....	88
Sitografia.....	91
Indice delle figure.....	92
Indice delle tabelle	93
Indice dei grafici	94

ABSTRACT

Negli ultimi anni, nuove tecnologie sono state sviluppate a supporto dei sistemi di trasporto intelligenti (ITS) grazie ad un'accentuata attenzione verso la mobilità sostenibile, con l'obiettivo di migliorare sicurezza stradale ed efficienza del traffico. I veicoli si sono evoluti in dispositivi tecnologicamente avanzati dotati di numerosi sensori di bordo, quali radar, videocamere e ultrasuoni, in grado di raccogliere informazioni sull'ambiente circostante. Tra le tecnologie emergenti più interessanti risaltano i sistemi cooperativi, dove i veicoli possono ricevere informazioni inviate dall'infrastruttura. L'interazione dei veicoli diventa possibile grazie allo sviluppo di tecnologie innovative di comunicazione veicolare come la comunicazione diretta tra veicoli (nota come V2V) o la comunicazione tra veicolo e infrastruttura stradale (nota come V2I).

L'obiettivo di questo elaborato è quello di verificare tramite l'uso del software di simulazione Vissim, quali intersezioni sono più idonee all'utilizzo del sistema di comunicazione Glosa, Green Light Optimized Speed Advisory, che permette ai semafori intelligenti di comunicare con le auto connessi CV.

In base alla geometria e al flusso di traffico confluyente nell'intersezione, vengono analizzate e catalogate le varie combinazioni di scenari per trovare quale tra questi apporta più benefici sia in termini di perditempo che di lunghezza della coda sia in termini ambientali con diminuzioni di emissioni di gas di scarico e di consumo di carburante, variando i tassi di penetrazione.

Il completamento di questa ricerca e catalogazione prevede che, per ogni combinazione di parametri, venga creata una categoria di intersezioni simulate che verranno associate con situazioni esistenti in una città, con il fine di stabilire da quali incroci è meglio cominciare ad installare il sistema di comunicazione GLOSA.

La ricerca è stata suddivisa in due grossi settori, intersezioni con una corsia per senso di marcia e due corsie. Durante lo svolgimento di questo studio, combinando varie situazioni sono state riscontrate delle intersezioni in cui non fosse stato possibile

utilizzare la tecnologia V2I, sia per problemi legati al superamento della capacità dell'incrocio in termine di flusso veicolare, sia per problemi legati all'incompatibilità del sistema stesso con la geometria.

La ricerca fino ad ora si è concentrata nel trovare l'algoritmo e il sistema ottimale per apportare i migliori benefici e la migliore rappresentazione della realtà, focalizzandosi su un incrocio preciso o un corridoio stradale. L'innovazione principale di questa simulazione risiede nella possibilità di analizzare innumerevoli situazioni di incrocio con il fine di capire come procedere per l'installazione di questa tecnologia, una volta che verrà trovato il sistema migliore per applicarla.

I risultati ottenuti sono stati divisi tra l'ambito urbano e quello suburbano, le percentuali dei miglioramenti ottenuti vengono riportate in base ai parametri usati per l'analisi degli scenari e indicano la riduzione ottenuta in ogni campo:

- intersezione con una corsia:
 - lunghezza coda 86%;
 - perditempo medio 69%;
 - consumo di carburante 63%;
 - emissioni di ossido di carburante CO 64%;
- intersezione con due corsie:
 - lunghezza coda 48%;
 - perditempo medio 29%;
 - consumo di carburante 33%;
 - emissioni di ossido di carburante CO 63%.

Grazie a questa analisi è stato possibile individuare le intersezioni che apportano più benefici, in modo da applicare al meglio la tecnologia Glosa nelle condizioni reali di una città.

ABSTRACT

In recent years, new technologies have been developed to support Intelligent Transport Systems (ITS) through a strong focus on sustainable mobility, with the aim of improving road safety and traffic efficiency. The vehicles have evolved into technologically advanced devices equipped with numerous on-board sensors (such as radars, camcorders and ultrasounds) capable of gathering information on the surrounding environment. Among the most interesting emerging technologies are cooperative systems, where vehicles can receive information sent by the infrastructure. Vehicle interaction becomes possible through the development of innovative vehicular communication technologies such as direct vehicle communication (known as V2V) or communication between vehicle and road infrastructure (known as V2I).

The aim of this elaboration is to verify using the Vissim simulation software, which intersections are most suitable for the use of the Glosa communication system, Green Light Optimized Speed Advisory, which allows smart traffic lights to communicate with connected CV vehicles.

Based on the geometry and flow of traffic flowing into the intersection, the various combinations of scenarios are analyzed and catalogued to find out which of them brings the most benefits in terms of loss of time and tail length and in environmental terms with decreases in exhaust emissions and fuel consumption, varying the penetration rates.

The completion of this search and cataloging provides that for each combination of parameters is created a category of simulated intersections that will be associated with existing situations in a city to determine from which intersections it is better to start install the GLOSA communication system. The research was divided into two main areas, urban and suburban. During this study, by combining various situations, intersections were found in which it was not possible to use the V2I technology, both

for problems related to exceeding the capacity of the intersection in terms of vehicular flow, for problems related to the incompatibility of the system itself with geometry.

The research so far has focused on finding the algorithm and the optimal system to support the best benefits and the best representation of reality, focusing on at precise intersection or a road corridor. The main innovation of this simulation lies in the possibility of analyzing innumerable situations of intersection with the aim of understanding how to proceed for the installation of this technology, once it will be found the best system to apply it.

The results obtained have been divided between the urban and the suburban, the percentages of the improvements obtained are reported according to the parameters used for the analysis of the scenarios, and they indicate the reduction obtained in each field:

- urban environment:
 - tail length 86%;
 - average waster 69%;
 - fuel consumption 63%;
 - emissions of fuel oxide CO 64%;
- suburban environment:
 - tail length 48%;
 - average waster 29%;
 - fuel consumption 33%;
 - emissions of fuel oxide CO 63%.

Thanks to this analysis it was possible to identify the intersections that bring the most benefits, to best apply Glosa technology in the real conditions of a city.

1

INTRODUZIONE

In questo capitolo introduttivo viene definito l'argomento centrale dell'elaborato di tesi, ovvero l'analisi dei benefici apportati, in diverse tipologie di incrocio, dall'uso dei sistemi di comunicazione tra veicolo e infrastruttura (V2I), in particolare tra le auto connesse e i semafori intelligenti.

Innumerevoli studi hanno analizzato e confermato i miglioramenti prodotti dall'uso di tale tecnologia sia in termini di traffico, cioè di perditempo, che in termini di emissioni e consumi di carburante. Pertanto nello specifico, si vuole individuare quali sono le intersezioni in cui è meglio iniziare ad installare il sistema di comunicazione, quindi si intende studiare le diverse tipologie di incrocio analizzando nel dettaglio i benefici a bassi livelli di penetrazione dei veicoli connessi.

Il lavoro presentato è il risultato di una serie di domande e problematiche riscontrate ogni giorno utilizzando la macchina in una città affollata come Milano.

Dopo aver conseguito la Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale presso il Politecnico di Milano, la passione per l'ambito dei trasporti mi ha portato a iscrivermi al corso di Laurea Magistrale, specializzato in questo settore.

Qui, in alcuni corsi che ho frequentato, tra i vari argomenti trattati, è stato esposto il concetto di veicoli connessi con l'infrastruttura che possono apportare miglioramenti sia per quanto riguarda l'impatto sul traffico e sia per quello ambientale. Questo ha catturato la mia attenzione tanto da portarmi ad approfondirne i vantaggi e gli svantaggi, analizzandone le particolarità che lo caratterizzano.

Il traffico stradale è in forte aumento a causa dell'espansione delle reti stradali, della presenza di più veicoli sulle strade e dell'aumento dei chilometri annuali totali percorsi.

L'Italia detiene il primato mondiale di auto private pro-capite (1,66 persone per vettura nel 2009) che percorrono circa 13000 km/anno, il 26% in più della media UE.

L'utilizzo dei veicoli ed è attualmente uno dei principali fattori che contribuiscono al consumo di energia, ai cambiamenti climatici e all'inquinamento atmosferico.

Questo documento cerca di sviluppare un sistema che utilizzi i sistemi intelligenti, i cosiddetti Intelligent Transportation Systems (ITS), che in ambito urbano si traduce con la tecnologia V2I, ovvero i semafori intelligenti sono in grado di comunicare con i veicoli connessi CV, Connected Vehicles, per ricevere informazioni su fasatura e temporizzazione del segnale (SPaT) e calcolare la linea d'azione ottimale.

La ricerca si è concentrata sullo sviluppo di dispositivi di adattamento intelligente della velocità (ISA Intelligent Speed Adaptation) che consigliavano ai conducenti la velocità desiderata.

Con il termine veicoli connessi CV, in generale, indichiamo le automobili in grado di comunicare in maniera bidirezionale con sistemi esterni, come per esempio l'infrastruttura, altre vetture o persino i pedoni.

In questa simulazione, invece, sono state utilizzate solo alcune delle caratteristiche di tali veicoli, infatti le auto connesse considerate in questo studio, sono in grado solo di ricevere informazioni dai semafori intelligenti, senza poter inviare a loro volta dei dati, come per esempio la posizione.

Le indicazioni fornite dall'infrastruttura riguardano la velocità ottimale da mantenere per raggiungere l'intersezione durante la fase di verde corrente o successiva, in modo da evitare l'arresto e la ripartenza dei veicoli, processo chiamato start and stop, che è una delle cause dell'inquinamento dovuto ai gas di scarico.

La modalità di guida di tali vetture rimane sempre di tipo manuale, non automatica, quindi con gli stessi parametri di reazione di un normale veicolo.

Nella figura 1 vediamo una scena stilizzata della funzione di questa tecnologia.



Figura 1: stilizzazione del sistema di comunicazione V2I

Viaggiando spesso nel traffico di Milano mi sono trovata di fronte a varie situazioni e problematiche che ho deciso di affrontare con questo studio. Nel 2019 ogni automobilista ha percorso nel traffico circa 256 ore, che corrispondono a più di 11 giorni, trascorsi tra ingorghi, rallentamenti, incroci bloccati e semafori rossi (dato calcolato su Milano, Roma e Napoli). Nell'ambiente urbano di queste città, in media, si incontra un semaforo ogni 30 secondi di viaggio in assenza di traffico.

L'intento è quello di sfruttare i semafori a vantaggio dell'automobilista apportando benefici anche per l'ambiente. I veicoli connessi, infatti, rappresentano una tecnologia sempre più emergente, che si sta diffondendo soprattutto negli ultimi anni, mettendo le basi per un futuro di auto autonome oltre che connesse.

Ritengo che l'introduzione di questo nuovo sistema tecnologico non sia così invasivo come può esserlo l'uso di veicoli a guida autonoma, per questo motivo mi è sembrato

un futuro molto vicino al nostro mondo e quindi realizzabile nel breve periodo, senza andare a parlare di tecnologie futuristiche troppo lontane dai nostri canoni.

Uno tra gli argomenti più discussi riguarda proprio il periodo di transizione verso l'utilizzo di tale tecnologia, in quanto bisogna valutare i miglioramenti e benefici che tali veicoli possano apportare rispetto ai veicoli convenzionali con bassi livelli di penetrazione.

Vediamo nel dettaglio le problematiche che hanno portato all'idea di questo elaborato e gli obiettivi che sono stati fissati.

1.1 Problematica affrontate

La domanda di trasporto è in forte espansione. Nel periodo dal 1990 al 2018 la domanda di trasporto in Italia è aumentata del 34%.

L'aumento dei veicoli nella rete stradale ha come conseguenza l'aumento del traffico che danneggia sia l'ambiente in termini di inquinamento (figura 2) che gli automobilisti che subiscono un ritardo sul tempo di viaggio che può causare stress e aumentare anche il fattore di incidentalità.

Nel 2007 la Commissione Europea ha elaborato una normativa riguardante le autovetture e i veicoli leggeri (CE, 2007), nella quale delineava una nuova strategia organica finalizzata alla riduzione del biossido di carbonio da questi veicoli venduti nell'Unione Europea, infatti il settore dei trasporti era il secondo più grande emettitore di gas serra nell'UE 27 e a oggi le cose non sono cambiate.

Nell'ambito delle strategie emanate per la riduzione delle emissioni di biossido di carbonio è stata intrapresa una prima strategia che si basava su una migliore informazione verso i consumatori e, attraverso misure fiscali, la promozione di automobili a maggiore risparmio di carburante.

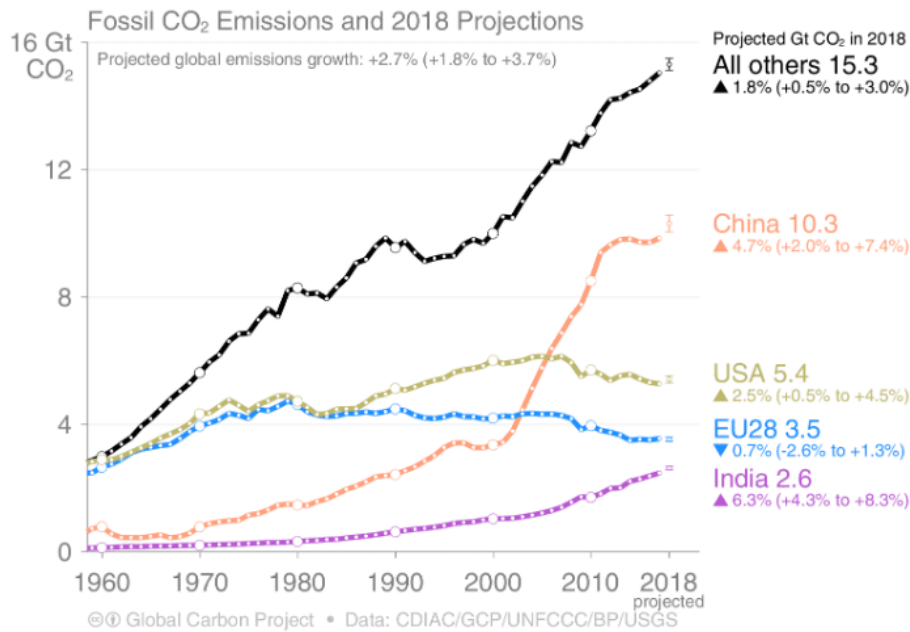


Figura 2: andamento delle emissioni suddiviso per continenti negli anni

Le innovazioni nella catena cinematica dei veicoli, nelle infrastrutture, nella progettazione della geometria stradale e nel funzionamento dei segnali stradali hanno migliorato l'efficienza del carburante di oltre l'83% negli ultimi 35 anni.

In aggiunta altri studi hanno approfondito il settore delle emissioni in funzione della velocità mantenuta durante un tragitto, arrivando alla conclusione che il livellamento delle traiettorie di velocità è risultato essere un metodo efficiente per risparmiare carburante.

A questo punto si inseriscono i sistemi di trasporto intelligenti (ITS) nel settore dei trasporti di superficie a metà degli anni '90, fornendo nuove capacità per mitigare gli impatti negativi sul traffico, sull'energia e sull'ambiente del traffico veicolare.

Tra le strategie moderne prevalenti, per ottenere risparmi energetici e migliorare gli impatti ambientali negativi del traffico veicolare, c'è la guida connessa che costituisce un insieme di regole che promuovono l'efficienza energetica facendo funzionare il motore del veicolo nei punti più efficienti in termini di consumo di carburante.

L'avvento della tecnologia dei veicoli connessi (CV) ha consentito lo sviluppo di applicazioni dinamiche di guida ecologica, offrendo consigli di guida ecologica in tempo reale ai conducenti.

La tecnologia utilizzata si basa sul sistema GLOSA - Green Light Optimized Speed Advisory, utilizza informazioni tempestive e accurate sui tempi dei segnali stradali e sulle posizioni dei segnali stradali per guidare i conducenti, attraverso la comunicazione da veicolo a infrastruttura (V2I), con consigli sulla velocità per un tragitto più uniforme con meno tempo di sosta attraverso i segnali stradali.

1.2 Obiettivo della tesi

Il lavoro di simulazione si basa sul metodo scientifico sperimentale che è stato introdotto da Galileo Galilei nel XVI secolo. Tale metodo consiste nei seguenti passaggi:

- fase di osservazione, in cui bisogna inquadrare il problema che si vuole studiare e raccogliere informazioni a suo riguardo;
- formulazione delle ipotesi, ovvero di una soluzione ipotetica del problema;
- realizzazione di esperimenti, attraverso la modellizzazione e la simulazione, per verificare la correttezza delle ipotesi formulate;
- elaborazione dei risultati, in caso di risultati positivi si può formalizzare un modello;
- pubblicazione dei risultati, al fine di rendere noti i progressi ottenuti.

L'obiettivo di questo elaborato è quello di studiare i benefici apportati dalla comunicazione tra semaforo intelligente e auto connesse. Per effettuare questa analisi è stato utilizzato il programma di simulazione VISSIM, con l'obiettivo di individuare quali sono le intersezioni in cui è meglio iniziare ad installare il sistema di comunicazione.

Si intende studiare le diverse tipologie di incrocio analizzando nel dettaglio i miglioramenti in termine di traffico ed emissioni a bassi livelli di penetrazione dei veicoli connessi.

Uno dei modi per ridurre l'eccessiva guida stop and go sulle strade urbane è ottimizzare i tempi dei segnali. Storicamente, gli strumenti di ottimizzazione della temporizzazione del segnale sono stati sviluppati per ridurre i ritardi e gli arresti subiti dai conducenti urbani. Più recentemente, nuovi metodi per l'ottimizzazione dei segnali stradali hanno incorporato cambiamenti nel comportamento dei conducenti per ottenere prestazioni ottimali agli incroci segnalati.

Questa tecnologia permette, appunto, di evitare l'arresto e la ripartenza dei veicoli e quindi di evitare inutili fermi in scenari di avvicinamento all'incrocio fornendo consigli ai conducenti sulla velocità da mantenere in base ai tempi di fase del segnale del semaforo attuale e futuro.

Dai precedenti studi, si evince che l'utilizzo del sistema GLOSA porta molti miglioramenti a livello di perditempo medio, lunghezza di coda media, consumo di carburante ed emissioni. Tali miglioramenti aumentano con il crescere del livello di penetrazione dei veicoli connessi CV. La ricerca, però, si è limitata a valutare i benefici del sistema per un preciso incrocio o per un preciso insieme di incroci che formano una rete, rimanendo una ricerca fine a sé stessa, senza andare a esaminare l'applicazione in tutti i vari tipi di incroci esistenti.

Nella simulazione vengono usati i dati del traffico, del ciclo semaforico e della geometria degli incroci. Combinando questi parametri sono stati costruiti vari scenari in cui viene variato il tasso di penetrazione dei veicoli connessi.

Oltre ad analizzare i vantaggi della comunicazione, sono stati trovati anche delle combinazioni in cui tale sistema non può essere applicato sia perché non arrecherebbe benefici elevati soprattutto a bassi tassi di penetrazione, sia per via dell'incompatibilità con certi tipi di geometria.

Una volta ottenuti tutti i risultati dalle simulazioni, sarà possibile valutare, per una qualsiasi città, gli incroci ottimali da cui partire per installare i sistemi intelligenti. In funzione della geometria, del flusso di traffico e del ciclo semaforico sarà possibile associare ogni scenario ad un incrocio realmente esistente in quella città.

1.3 Composizione dei capitoli

Per permettere di orientarsi più facilmente viene riportata una breve descrizione della struttura di questa tesi e degli step seguiti per la realizzazione del lavoro.

Il Capitolo 2 è volto a fornire una panoramica generale dell'evoluzione della tecnologia usata per la comunicazione tra veicolo e infrastruttura, mentre nella seconda parte, la descrizione si focalizza in particolare sull'interazione tra i semafori intelligenti e le auto connesse, argomento che ha catturato la mia attenzione e da cui sono partita per poi sviluppare i capitoli successivi.

Nel Capitolo 3, infatti, troviamo una panoramica riguardo al software di simulazione del traffico PTV VISSIM e del software Python utilizzato per la parte relativa alla programmazione del calcolo della velocità ottimale e la sua comunicazione.

Nel Capitolo 4, viene eseguita una rassegna della letteratura che evidenzia i precedenti studi riguardanti l'applicazione GLOSA e altri sistemi di invio di informazioni tra infrastruttura e i veicoli.

Il Capitolo 5, invece, descrive gli elementi che costituiscono la simulazione e lo schema della modellizzazione.

Nel Capitolo 6 viene effettivamente testata la tecnologia attraverso la simulazione dei vari scenari, riportando i passaggi e i ragionamenti che hanno portato alla definizione di tali contesti.

Nel Capitolo 7 vengono raggruppati i risultati ottenuti, fornendo grafici e tabelle per esaminare in modo più rapido i successi ottenuti.

Infine, nel Capitolo 8, lo studio termina con le conclusioni e in aggiunta vengono forniti degli spunti per analisi future che possono continuare il processo di innovazione in questo campo verso nuove forme di mobilità, si spera, sempre più sicure e sostenibili.

2

COMUNICAZIONE TRA VEICOLO E INFRASTRUTTURA, V2I

La ricerca di questo elaborato si basa sulla simulazione tramite il software VISSIM cercando di riprodurre e analizzare gli effetti dell'utilizzo dei semafori intelligenti che comunicano con i veicoli.

In questo capitolo viene descritta la parte tecnologica riguardante lo sviluppo dei sistemi di trasporto intelligenti, Intelligent Transportation Systems (ITS), del sistema GLOSA (Green Light Optimized Speed Advisory) per la comunicazione tra veicolo ed infrastruttura e più nel dettaglio l'invio di informazione tra auto e semafori intelligenti.

2.1 Sviluppo dei dispositivi per la comunicazione, Intelligent Transportation Systems (ITS)

Il settore dei trasporti stradale è in forte via di sviluppo, le più importanti complicazioni di tale ambito riguardano la congestione delle strade, la sicurezza e l'inquinamento atmosferico.

Secondo le statistiche italiane la popolazione maggiorenne, aggiornata al 2018, è composta da 52,4 milioni di persone, di cui 39,2 milioni hanno la patente di guida. Dal database dell'Istat risulta che nel 2018 in Italia il parco veicoli era composto da quasi 51,7 milioni di veicoli, di questi, poco più di 39 milioni, ovvero il 75% sono automobili. In media, quindi, un patentato possiede un'auto circa.

L'ingente numero di veicoli comporta la presenza di traffico elevato nelle grandi città, principalmente nelle ore di punta, e come conseguenza si ha un elevato tasso di

inquinamento atmosferico, oltre i due terzi delle emissioni derivate dal trasporto stradale sono causate da veicoli non merci.

Un altro dato molto importante è il numero di incidenti stradali, nel 2019 sono stati circa 172.200 gli incidenti stradali con lesioni a persone.

Negli anni la ricerca si è concentrata sul miglioramento dei sistemi utilizzati per ridurre il rischio di incidenti, come gli airbag o l'assistenza alla frenata, l'ABS. Adesso, invece, la parola chiave è “smart”, intelligenza, ovvero veicoli intelligenti capaci di comunicare e di scambiarsi informazioni.

I progressi nelle comunicazioni wireless e in particolare nelle comunicazioni veicolari hanno portato all'avvento dei sistemi di trasporto intelligenti cooperativi. Questi sistemi utilizzano tecnologie di comunicazione veicolare per consentire la distribuzione di applicazioni che potrebbero potenzialmente migliorare la sicurezza stradale, l'efficienza del traffico e introdurre nuove applicazioni di intrattenimento e aziendali

Esistono due tipologie di comunicazione nelle reti:

- V2V: (Vehicle to Vehicle) comunicazione tra veicolo e veicolo;
- V2I: (Vehicle to Infrastructure) comunicazione tra il veicolo e l'infrastruttura.

Inizia così il programma Intelligent Transportation Systems (ITS) per aumentare l'uso della tecnologia nel settore dei trasporti di superficie. L'iniziativa mira a riunire i vantaggi del collegamento di veicoli e infrastrutture per migliorare la sicurezza stradale, ridurre la congestione del traffico e mitigare gli impatti ambientali dei trasporti.

I primi utilizzi della tecnologia ITS sono avvenuti in ambito extraurbano grazie allo studio dell'IVHS (Intelligent Vehicle Highway System) che attraverso l'uso di sottocategorie apporta miglioramenti in termini di ritardo ed emissioni. Le principali aree definite come parte del processo di pianificazione del programma sono:

1. sistemi avanzati di gestione del traffico;
2. sistemi avanzati di informazione ai viaggiatori;
3. operazioni di veicoli commerciali;
4. sistemi avanzati di controllo del veicolo.

Questo sistema si basa sull'utilizzo di unità lungo l'infrastruttura, detti RSU, che comunicano con i veicoli. Con le informazioni ricevute, i conducenti possono rispondere

tempestivamente in caso di situazioni eccezionali come incidenti, frenate di emergenza e ingorghi.

In ambito urbano per migliorare le condizioni del traffico non si può più aumentare la rete stradale perché si è ad un punto di saturazione, quindi l'unica possibilità è quella di migliorare la viabilità delle strade esistenti.

Si cerca, quindi, di implementare tale tecnologia anche in ambito urbano, le informazioni inviate dell'infrastruttura al veicolo e viceversa si concentrano principalmente su 3 ambiti:

- evitare rischi di incidenti e rendere la guida sicura tramite l'invio di messaggi riguardo rischi ed ostacoli, per esempio un veicolo ferma o la pavimentazione sconnessa;
- ridurre la congestione stradale, migliorando la viabilità, riducendo il tempo di viaggio avvisando in modo intelligente i singoli conducenti sugli eventi del traffico, come la presenza di incidenti e ingorghi o le fasi del semaforo;
- la terza categoria si concentra su un aspetto puramente commerciale e di intrattenimento segnalando eventuali stazioni di rifornimento, hotel o attrazioni turistiche.

Questo elaborato si concentra sul secondo ambito, con particolare attenzione alle fasi del semaforo.

Il consumo di carburante più elevato sulle arterie urbane è associato alla guida nel traffico congestionato, caratterizzato da maggiori fluttuazioni di velocità e frequenti fermate agli incroci. Il miglior flusso di traffico sulle arterie, in termini di consumi ed emissioni, è quello con il minor numero di fermate, i ritardi più brevi e le velocità moderate mantenute per tutto il tragitto.

Uno dei modi per ridurre l'eccessiva guida stop and go sulle strade urbane è ottimizzare i tempi dei segnali. Storicamente, gli strumenti di ottimizzazione della temporizzazione del segnale sono stati sviluppati per ridurre i ritardi e gli arresti subiti dai conducenti urbani.

2.2 Sistema GLOSA, Green Light Optimized Speed Advisory

La tecnologia dei veicoli connessi fornisce un ambiente di comunicazione wireless bidirezionale che consente comunicazioni da veicolo a veicolo e da veicolo a infrastruttura, che possono essere utilizzate per una varietà di applicazioni di mobilità e sicurezza. Una di queste applicazioni è denominata GLOSA (Green Light Optimized Speed Advisory).

Questo sistema utilizza informazioni tempestive e accurate sui tempi dei segnali stradali e sulle posizioni dei segnali stradali per guidare i conducenti (attraverso la comunicazione infrastruttura-veicolo) con consigli sulla velocità per un tragitto più uniforme con meno tempo di sosta attraverso i segnali stradali.

La comunicazione bidirezionale tra semafori intelligenti e veicoli e si divide in due grossi ambiti:

1. controllo adattivo dell'incrocio, dove avviene la modifica del tempo di verde in base al flusso di traffico in arrivo in una direzione comunicato dal veicolo al semaforo;
2. l'invio dell'informazione, dal semaforo al veicolo, relativa alla velocità da tenere affinché il veicolo arrivi all'incrocio durante la fase di verde, per evitare la fermata e ripartenza, figura 3.

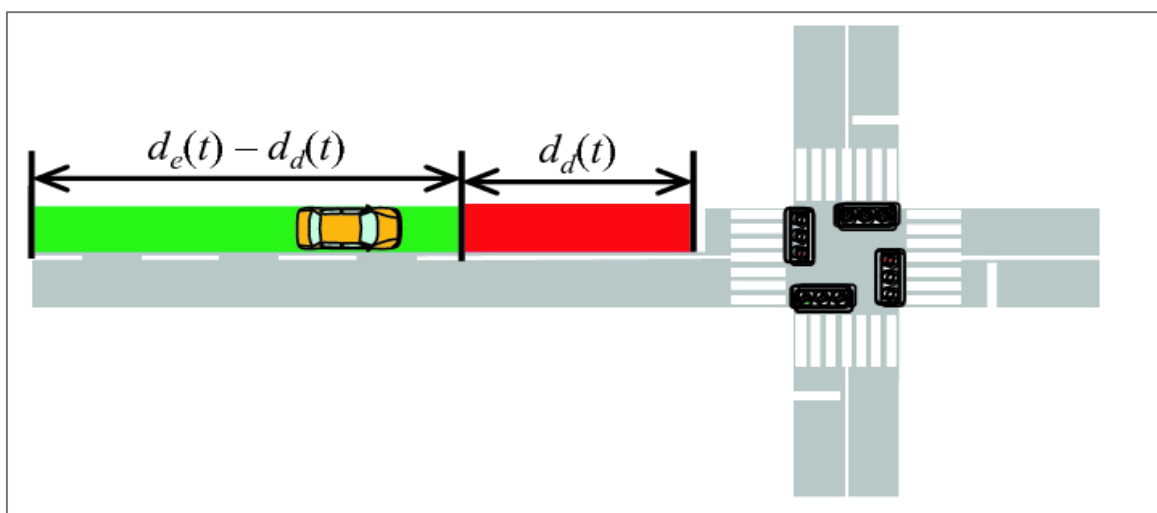


Figura 3: calcolo della velocità da comunicare in base alla distanza dal semaforo

Questo elaborato si focalizza nello studio del secondo aspetto, attraverso un sistema GLOSA per ridurre la congestione del traffico diminuendo il tempo medio di sosta dietro i semafori.

Questa applicazione offre il vantaggio di informazioni tempestive e accurate sui cicli dei semafori che rimangono fissi e sulla posizione dei semafori, inoltre fornisce ai conducenti consigli sulla velocità guidandoli a mantenerla costante così da avere tempi di arresto ridotti ai semafori.

Gli studi hanno portato ai veicoli connessi, Connected Vehicles (CV), una tecnologia precedentemente chiamata IntelliDrive, che fornisce un ambiente di comunicazione wireless bidirezionale che consente comunicazioni da veicolo a infrastruttura (V2I) e viceversa (I2V).

In questo elaborato, la componente dell'infrastruttura, protagonista della comunicazione, è il semaforo intelligente che permette ai veicoli di arrivare in prossimità dell'incrocio durante la fase di verde, attraverso l'uso di algoritmi che permettono il calcolo della velocità ottimale per raggiungere l'intersezione durante la fase di verde corrente o nella successiva in base al limite di velocità.

2.3 Impianto di comunicazione tra semaforo e veicolo

Vediamo nel dettaglio l'architettura complessiva del sistema e i componenti che permettono la comunicazione e l'elaborazione dei dati, sia dal punto di vista dei veicoli, che dal punto di vista dell'infrastruttura.

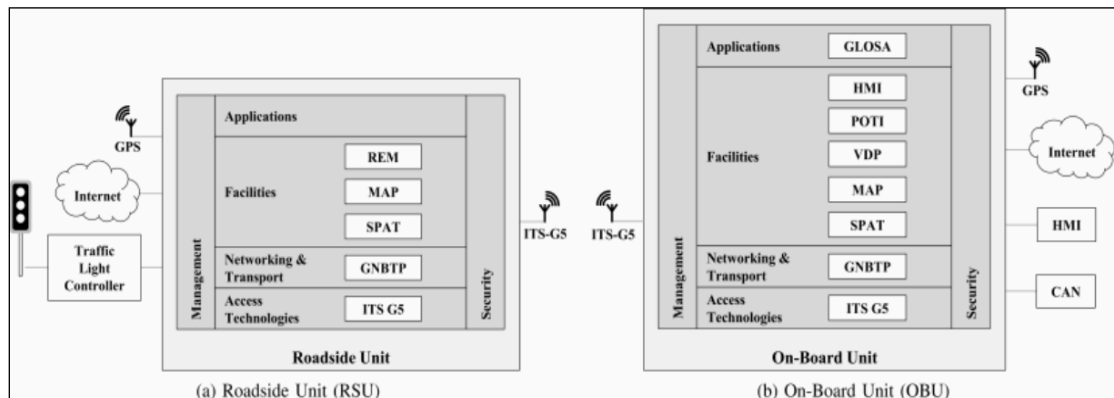


Figura 4: componenti dei sottosistemi

La Figura 4 mostra le interfacce hardware, l'architettura dei livelli e i componenti software dei sottosistemi a lato strada RSU (RoadSide Unit) e dei sistemi a bordo del veicolo OBU (On-Board Unit) che stabiliscono una comunicazione V2I conforme a ITS-G5. Come mostrato nella Figura 1a, ci sono diversi componenti hardware collegati alla RSU.

Un ricevitore GPS nel semaforo fornisce informazioni sulla posizione e consente la sincronizzazione dell'ora. Il collegamento al controller consente di ottenere informazioni sulle fasi del semaforo attuali e future. Un doppio ricetrasmittitore ITS-G5 consente la trasmissione e la ricezione del segnale da e verso altri nodi di rete.

La Figura 1b mostra l'OBU che permette l'accesso a informazioni come la velocità o lo stato degli indicatori di direzione del veicolo. L'interfaccia HMI (Human-Machine Interface), ovvero il display del quadro strumenti, consente di fornire informazioni al conducente.

In generale, il sistema si basa su due tipi di messaggi: SPAT (Signal Phase and Timing Message) e MAP (Map Data Messages). Lo SPAT informa sullo stato del semaforo, quindi la fase corrente e la fase successiva per ciascuna corsia di un incrocio, i MAP forniscono informazioni sulla topologia di un incrocio come il numero di corsie e le restrizioni di svolta.

Per fornire al conducente la velocità ottimale o informazioni sul tempo mancante per la prossima fase di verde, TTG (Time-to-Green), un veicolo deve ricevere almeno un

messaggio di ogni tipo e collegarlo utilizzando l'ID univoco dell'incrocio incluso nei messaggi.

Quando viene ricevuto un messaggio, l'applicazione genera una geometria abbinando le fasi del segnale e i dati di temporizzazione relativi al numero di corsia.

Prima che il consiglio di velocità o il TTG possa essere fornito al componente HMI, è necessario avere anche delle informazioni derivanti dal veicolo stesso, attraverso i sistemi VDP (Vehicle Data Provider) e il VDP (Position and Time) che fornisce la posizione e il tempo tramite il GPS.

Nella Figura 5 sono illustrati due scenari di intersezione. Nella parte superiore di ogni figura è indicata la durata e la sequenza delle fasi del semaforo nel tempo tramite barre rosse e verdi.

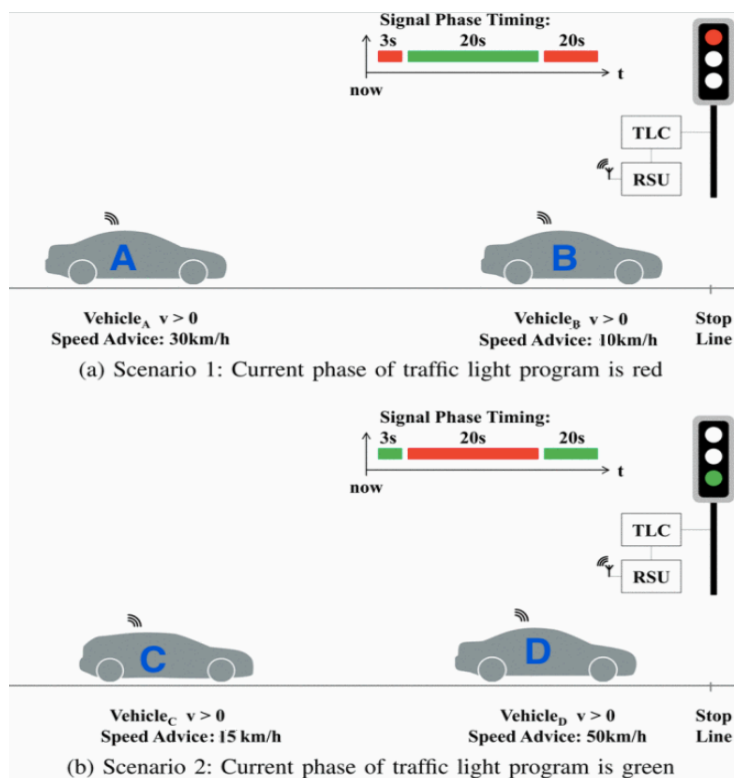


Figura 5: scenari di approccio all'incrocio

Il primo scenario, nella figura 5°, rappresenta un avvicinamento all'incrocio durante una fase di semaforo rosso che durerà ancora per 3 secondi seguita da 20 secondi di verde. Il veicolo A si sta avvicinando al semaforo e l'applicazione GLOSA determina, in base alla posizione del veicolo e alle informazioni incluse nei messaggi MAP e SPAT ricevuti, se il veicolo può attraversare il segnale nella prossima fase verde. Quindi, un avviso di velocità viene visualizzato sull'HMI, che in questo caso è una raccomandazione di 30 km/h. Il veicolo B, invece, essendo in una posizione più ravvicinata rispetto all'incrocio, visualizza l'avviso di procedere a 10 km/h.

La Figura 5b mostra uno scenario di avvicinamento durante una fase di semaforo verde che ha una durata di 3 secondi. Il veicolo D è prossimo ad attraversare l'incrocio durante la fase di verde attuale, quindi visualizza un avviso di velocità sull'HMI che è il limite di velocità massimo di 50 km / h in questo esempio.

Il veicolo C è più lontano dall'intersezione quindi non riuscirà a passare durante la fase di verde corrente rimanendo entro i limiti di velocità, quindi gli viene comunicata una velocità consigliata di 15 km/h per arrivare al semaforo durante la fase di verde successiva.

Le velocità consigliate vengono quindi calcolate dal veicolo per attraversare l'incrocio durante la fase verde per evitare fermate e manovre di accelerazione non necessarie, in questo modo il sistema apporta benefici ambientali riducendo le emissioni di CO e il consumo di carburante.

3

SOFTWARE DI SIMULAZIONE DEL TRAFFICO

3.1 Software di simulazione VISSIM

PTV Vissim è il software di simulazione del traffico più avanzato e flessibile, simula realisticamente a livello microscopico complesse interazioni tra veicoli, modella la domanda e i comportamenti dei guidatori nel minimo dettaglio, inoltre, simula nuove forme di mobilità come i veicoli connessi CV (Connected Vehicles) e i servizi di mobilità MaaS (Mobility as a Service).

Sperimentare delle soluzioni di mobilità direttamente nel mondo reale è costoso, per evitare questi oneri è necessario poter effettuare degli esperimenti in un ambiente di simulazione dei flussi di traffico prima dell'implementazione. Con PTV Vissim puoi testare diversi design di giunzioni e ottimizzazione semaforica per vedere quale soluzione è più efficace.

Fornisce simulazione dei flussi di traffico a diversi livelli di risoluzione, tutti in un unico software. A livello microscopico, il software di simulazione offre un altissimo livello di dettaglio, permettendo di modellare veicoli e pedoni individualmente. I modelli mesoscopici hanno un livello di dettaglio inferiore. Questa riduzione del dettaglio diminuisce sensibilmente lo sforzo richiesto per la modellazione e per la durata della simulazione, rendendola una soluzione più efficiente.



Figura 6: software VISSIM

Quando necessario, il software offre anche la possibilità di realizzare una simulazione 'ibrida' combinando simulazione microscopica e mesoscopica. PTV Vissim permette di mantenere controllo totale e flessibilità, per permettere di selezionare il livello di dettaglio per ogni specifica applicazione, senza compromessi.

Questo sistema permette la simulazione incorporata di tutti gli utenti della strada, sia gli utenti deboli come i pedoni, ciclisti e motociclisti, sia veicoli come auto, tram autobus e camion, in un'unica piattaforma software.

PTV Vissim è molto versatile, infatti può essere usato per simulare il traffico stradale nel dettaglio, sia in città che in autostrada, e permette di elaborare strategie di gestione della mobilità più efficienti per risolvere ogni tipo di problema.

Attraverso i collegamenti e i connettori è possibile mappare la rete nel dettaglio e modellare diverse geometrie a partire da nodi standard fino a intersezioni complesse, così da simulare il movimento in numerosi scenari e casi d'uso.

La simulazione viene considerata come una replica concreta delle condizioni reali in quanto sono presenti rappresentazioni dettagliate della geometria e dei comportamenti dei veicoli individuali. Per ottenere risultati accurati, il movimento dei veicoli può essere

calibrato nella simulazione, così che il comportamento di guida rifletta le condizioni del traffico locale.

I veicoli a guida autonoma suonano spesso come una tecnologia ancora nuova e misteriosa, eppure possono portare grandi benefici: diminuzione del traffico, emissioni ridotte, parcheggi più efficienti, costi di trasporto più bassi per tutti e riduzioni dei costi delle infrastrutture. Potrebbero anche migliorare la mobilità di anziani e persone disabili. Purtroppo per dimostrare la loro effettiva affidabilità e raggiungere un futuro davvero 'autonomo' questi veicoli dovrebbero essere guidati e testati.

PTV Vissim permette di testare il comportamento dei veicoli connessi o autonomi in qualsiasi contesto. Che si tratti degli ingorghi in tangenziale in città nell'ora di punta o del traffico autostradale, fornisce un solido set di funzionalità per condurre test di realtà virtuale in qualsiasi situazione.

Per studiare l'efficienza di queste nuove tecnologie è possibile connettere facilmente il software di simulazione del traffico ad altre soluzioni software PTV. VISSIM dispone di un modulo opzionale che offre funzionalità COM (Component Object Model) per l'utilizzo di ambienti di programmazione esterni come MatLab, Python, JavaScript, Excel. In questo modo è possibile automatizzare alcune operazioni eseguendo i comandi COM da un programma esterno.

PTV Vissim ti assiste nel massimizzare la capacità dell'infrastruttura esistente, permettendoti di rappresentarla in una veste grafica altamente personalizzabile e con visualizzazione dei dati impeccabile.

Grazie alla possibilità di utilizzare sia scenari standard pronti all'uso sia scenari di traffico personalizzati, il software è adatto ad ogni esigenza. Nella simulazione è anche possibile replicare scenari di guida molto specifici come incidenti o particolari eventi meteorologici per simulare varie situazioni impreviste.

3.1.1 Criteri di valutazione

La simulazione verifica gli effetti delle tecnologie usate sul flusso di traffico complessivo dando come output numerosi dati:

- informazioni sulla coda: lunghezza media e massima;
- numero dei veicoli per ogni scelta di percorso;

- dati relativi al moto dei veicoli: velocità calcolata come media aritmetica o media armonica e l'accelerazione;
- tempo necessario per percorrere la distanza prestabilita;
- il perdimento medio dei veicoli;
- il tasso di occupazione espresso in percentuale;
- valore del livello di servizio, LOS (Level Of Service) da 1 che corrisponde ad A, ottimo, a 6 che corrisponde a F, pessimo;
- informazioni sulle tempistiche: perditempo medio per veicolo;
- dati sulle emissioni di monossido di carbonio CO, di ossido di azoto NOx e di composti organici volatili VOC;
- il consumo di carburante ricavato dai modelli di comportamento di guida.

Tali dati verranno raggruppati in un file Excel per poterli rappresentare attraverso dei grafici a colonna che sono di più facile comprensione visiva.

Per la valutazione di questo studio mi sono concentrata sui miglioramenti del flusso di traffico, quindi la lunghezza della coda media, il tempo di percorrenza medio, e gli aspetti ambientali come il consumo di carburante e le emissioni.

Vissim determina il perditempo medio veicolare di tutti i veicoli che hanno percorso l'intersezione tenendo conto delle corsie e del semaforo utilizzando una valutazione creata automaticamente per ciascun ramo nell'intera simulazione. Le misurazioni di perditempo registrano il numero di veicoli, i perditempo medi, perditempo a fermo medi e il numero di fermate.

La funzione valutazione di nodo determina anche le emissioni di gas esausti. Alla base, vi sono sia formule standard dei valori di consumo derivanti da TRANSYT 7-F, un programma per l'ottimizzazione dei tempi semaforici, sia i dati relativi alle emissioni derivanti dall'Oak Ridge National Laboratory (laboratorio nazionale di Oak Ridge, facente capo al Dipartimento per l'energia degli Stati Uniti d'America).

Questi dati fanno riferimento ad un parco veicoli tipico del Nord America e non distinguono i singoli tipi di veicoli, Ciò consente di utilizzare la valutazione di nodo per un più semplice confronto delle emissioni prodotte in scenari diversi.

Le lunghezze di coda vengono registrate dai contatori di coda che si posizionano su ogni ramo al primo semaforo o nel marker di conflitto (rosso) di una regola di precedenza sulla sequenza di archi della relazione di svolta.

3.2 Software di programmazione Python

Python è un linguaggio di programmazione moderno, grazie alla sua dinamicità gli ambiti di applicazione sono svariati: sviluppo di software, siti o applicazioni Web e desktop, realizzazione di interfacce grafiche, amministrazione di sistema, calcolo scientifico e numerico, database, giochi, grafica 3D, eccetera.

Offre un forte supporto all'integrazione con altri linguaggi e programmi, è fornito di una estesa libreria standard che permette un facile utilizzo del sistema.

Python risulta facile da scrivere e da leggere, visivamente si presenta in modo lineare e pulito limitando l'uso di parentesi, con pochi costrutti sintattici. Come input al programma vengono inserite le variabili con cui vengono eseguiti i cicli.

A conferma della semplicità della sintassi, Python ha solo due forme di ciclo:

- ciclo for: che itera sugli elementi di una lista o su un iteratore
- ciclo while: che continua ad elaborare fino a che l'equazione specificata risulterà vera.

Allo stesso modo, il programma ha solamente il costrutto if e if-else per le scelte condizionate, figura 7. A differenza dagli altri linguaggio di programmazione non possiede né i cicli do e untill, né i costrutti switch e got.

```
def fattoriale(x):  
    if x == 0:  
        return 1  
    else:  
        return x * fattoriale(x-1)
```

Figura 7: esempio di scrittura in Python

Analogamente ad altri linguaggi di programmazione, in Python è possibile lasciare dei commenti nelle righe di codice per comprendere meglio ciò che accade eseguendo il programma. In Python i commenti (già a partire dalle primissime versioni del linguaggio di programmazione) si introducono con il simbolo "#" per non alterare il codice.

Python permette di aggirare in modo facile l'ostacolo delle performance pure: è infatti relativamente semplice scrivere un'estensione e poi utilizzarla all'interno di Python, sfruttando così l'elevata velocità di un linguaggio compilato solo nelle parti in cui effettivamente serve e sfruttando invece la potenza e versatilità di Python per tutto il resto del software.

4

STATO DELL'ARTE

Nel seguente capitolo verrà trattata la rassegna della letteratura che evidenzia lavori precedenti su questo argomento. Verranno analizzati i precedenti studi riguardanti l'applicazione GLOSA e altri sistemi di comunicazione tra infrastruttura e i veicoli.

La ricerca sulle auto connesse in prossimità di incroci segnalati sta procedendo rapidamente e sta producendo una varietà di quadri concettuali e metodologici, obiettivi applicativi e modelli per valutare il miglioramento del traffico e delle condizioni ambientali. Questi progressi richiedono l'analisi della letteratura esistente per migliorare la comprensione degli aspetti della ricerca, l'applicabilità dei servizi e il loro impatto sul sistema di trasporto stradale, in modo da avere una base di studi da cui partire per procedere con il progresso tecnologico.

Verranno evidenziate le differenze tra i vari articoli e con questo elaborato, mostrando come si è evoluto il campo della simulazione con l'avvento delle nuove tecnologie in campo automobilistico.

Per scegliere gli esperimenti più pertinenti a questo elaborato sono stati fissati dei requisiti per predisporre la raccolta:

- simulazione svolta in ambito urbano o suburbano;
- presenza della comunicazione tra semaforo e veicolo V2I;
- invio delle informazioni sulla velocità da tenere o del time to green;
- studio del grado di penetrazione dei veicoli connessi
- analisi dei risultati

Numerosi studi hanno già dimostrato il potenziale della comunicazione V2I per migliorare l'efficienza del traffico veicolare sulle strade, il consumo del carburante e le

emissioni degli scarichi. Gli articoli esaminati verranno divisi in base a tipi di geometrie: un singolo incrocio o un corridoio stradale.

4.1 Studi relativi ad un singolo incrocio

Widodo, Hasegawa e Tsugawa nell'articolo *“Vehicle fuel consumption and emission estimation in environment-adaptive driving with or without inter-vehicle communications”* hanno studiato l'impatto della guida adattiva all'ambiente con e senza comunicazioni tra veicoli, V2V. In questo studio viene applicato un modello semplicistico per il comportamento di guida e i segnali stradali a tempo fisso. I risultati della simulazione hanno mostrato che la guida adatta all'ambiente è efficace per ridurre sia il consumo medio di carburante che le emissioni del veicolo. È stato anche dimostrato che le comunicazioni tra veicoli possono migliorare questi impatti in presenza di alte densità di veicoli e lunghi cicli di segnale.

In uno studio simile, *“Predicting traffic lights to improve urban traffic fuel consumption”* di Sanchez, Cano e Kim, è stato studiato l'impatto di un algoritmo simile a GLOSA sul consumo di carburante in un ambiente I2V. I risultati della simulazione mostrano che è possibile ottenere una riduzione del consumo di carburante del 30% se solo un'auto su dieci utilizza il modello di conducente proposto.

Wegener, A., Hellbruck, H., Wewetzer, C., and Lubke, A. in *“Vanet simulation environment with feedback loop and its application to traffic light assistance”*, ha aggiunto due livelli di complessità agli approcci simili a GLOSA. È stata simulata la dinamica del traffico in un simulatore di traffico (Sumo) mentre le comunicazioni nelle reti ad-hoc veicolari, VANET (vehicular ad-hoc networks), sono state modellate in un simulatore di comunicazione di rete (TraCI). È stato stabilito un ciclo di feedback tra i due simulatori.

Asadi e Vahidi in *“Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal 18 information for improving fuel economy and reducing trip time”* hanno fatto un ulteriore passo avanti e hanno proposto un controllo predittivo della velocità del veicolo basato sull'ottimizzazione delle traiettorie dei veicoli attraverso diversi segnali stradali a valle. Il potenziale impatto che questa comunicazione segnale-veicolo potrebbe avere sul

consumo di carburante, sui livelli di emissione e sul tempo di viaggio è stato dimostrato con tre casi di studio di simulazione di esempio.

4.2 Studi relativi ad incroci multipli in successione

Katsaros, Kernchen, Dianati e Riecky nell'articolo "*Performance study of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) Application Using an Integrated Cooperative ITS Simulation Platform*" ha testato uno scenario simile a GLOSA in un modello a due intersezioni sviluppato in SUMO. Gli autori hanno utilizzato VSimRTI per abilitare un'interfaccia online tra i modelli di simulazione del traffico e della comunicazione. Viene comunicata la velocità da mantenere, analizza diversi valori di penetrazione, imposta la velocità minima a 6 m/s, ovvero circa 21 km/h e stabilisce la distanza ottimale per l'invio della comunicazione a 350 m.

I risultati mostrano che maggiore è il tasso di penetrazione di GLOSA, maggiori sono i vantaggi in termini di consumo di carburante e congestione del traffico. Man mano che la densità diminuisce, si riducono i vantaggi per l'efficienza del carburante, ma aumenta l'efficienza del traffico. Inoltre, come lavoro futuro propone che la distanza di attivazione ottimale, alla quale l'applicazione GLOSA dovrebbe avvisare il conducente, dovrebbe essere calcolata dall'ultima macchina in coda e non dal semaforo.

Tielert, Hartenstei, Luz, Hausberger e Benz nello studio "*The impact of traffic-light-to-vehicle communication on fuel consumption and emissions*", oltre al software di simulazione del traffico Vissim, hanno inserito anche il modello di emissioni pesanti (PHEM), per studiare l'impatto di un approccio simile a GLOSA sul consumo di carburante e sulle emissioni. La simulazione si basa su una rete di 15 incroci, analizzando diversi gradi di penetrazione e in aggiunta effettua un'indagine sulla distanza massima a cui dare la comunicazione della velocità.

L'analisi di sensibilità ha identificato la scelta delle marce e la distanza dal semaforo alla quale i veicoli vengono informati come fattori di influenza chiave. I risultati indicano che una scelta di marcia non ottimale può annullare i vantaggi dell'adattamento della velocità. Questo studio ha avuto una maggiore risonanza nella comunità degli ingegneri del traffico

poiché sia PHEM che VISSIM sono considerati strumenti in grado di replicare rispettivamente le emissioni di campo e le misure delle prestazioni del traffico.

Nouha Rida, Abderrahim Hasbi e Ouadoud Mohammed in *“Coordinated Signal Control System in Urban Road Network”* hanno effettuato uno studio di simulazione su 24 incroci inserendo il confronto con e senza l'uso dei semafori adattivi con l'obiettivo diminuire il tempo di attesa medio e il consumo di carburante.

Come lavori futuri propone un'applicazione su diversi scenari di traffico e la rilevazione delle emergenze per dargli la priorità nel tragitto.

In uno studio recente del 2019 *“CACC Proef Noord Holland”* di Gerdien Klunder, Michel Legius, Hettie Boonman e Ron Wouters è stato eseguito un test pratico in Olanda con veicoli dotati di ACC (Adaptive Cruise Control) e CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control) in una rete stradale formata da 6 semafori intelligenti, insieme al traffico regolare della città.

In aggiunta è stato effettuato anche un confronto con la simulazione di tale caso in VISSIM per valutare la corrispondenza dei parametri usati tra le simulazioni e la realtà. Sono stati analizzati due livelli di traffico, sia l'ora di punta che l'ora di morbida e come ipotizzato se il sistema porta dei vantaggi durante l'ora di punta, questi non possono che incrementare durante l'ora di morbida. Sono stati considerati diversi valori di penetrazione (0%, 10%, 50%, 100% sia di ACC che di CACC).

Attraverso i veicoli dotati di CACC, questo studio è in grado di valutare anche i miglioramenti dati della richiesta di tali veicoli di estendere la fase di verde in caso di traffico elevato.

I risultati mostrano che per bassi livelli di penetrazione i veicoli ACC possono portare anche a lievi peggioramenti invece per avere significativi miglioramenti sono necessari almeno il 50% di veicoli CACC, situazione in cui si possono creare plotoni di veicoli connessi.

4.3 Applicazioni esistenti

GLOSA assieme alla funzione Time to Green rappresentano il pilastro su cui si basa un nuovo servizio che la casa automobilistica Audi sta mettendo a disposizione dei propri clienti, per sfruttare nella viabilità urbana l'onda verde e procedere così senza soste, e quindi con tempi di percorrenza ottimali e bassi consumi di carburante, riducendo l'antieconomico stop-and-go.

Grazie al collegamento Veicolo e Infrastruttura (V2I), 450 semafori di Dusseldorf, su un totale di circa 600, utilizzeranno la rete per scambiare informazioni con i vari sistemi di bordo (tra cui Audi Traffic Light Information) e ottimizzare la fluidità del traffico.

In base alla fase del semaforo vengono applicate due funzioni principali dell'Audi Traffic Light Information: Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) e Time-to-Green. La prima calcola la velocità ideale per prendere un'onda verde, indicando al conducente l'andatura corretta per trovare il verde al prossimo semaforo, ovviamente sempre rispettando i limiti. In questo modo si evitano accelerazioni inutili, diminuisce il livello di stress e aumenta la sicurezza.

L'informazione verrà visualizzata sul cruscotto dell'auto che costituisce l'interfaccia tra l'uomo e la macchina, come mostrato nella figura 8 sottostante.



Figura 8: comunicazione della velocità, veicolo Audi

La funzione Time-to-Green, invece, interviene quando lo stop al semaforo è inevitabile. In questo caso inizia un conto alla rovescia che indica quanto tempo manca all'arrivo del verde, in modo che conducenti possano avere più reattività alla partenza, eliminando il tempo di reazione allo scattare del verde. Anche in questo caso l'informazione viene sempre comunicata attraverso l'interfaccia uomo-macchina, figura 9.

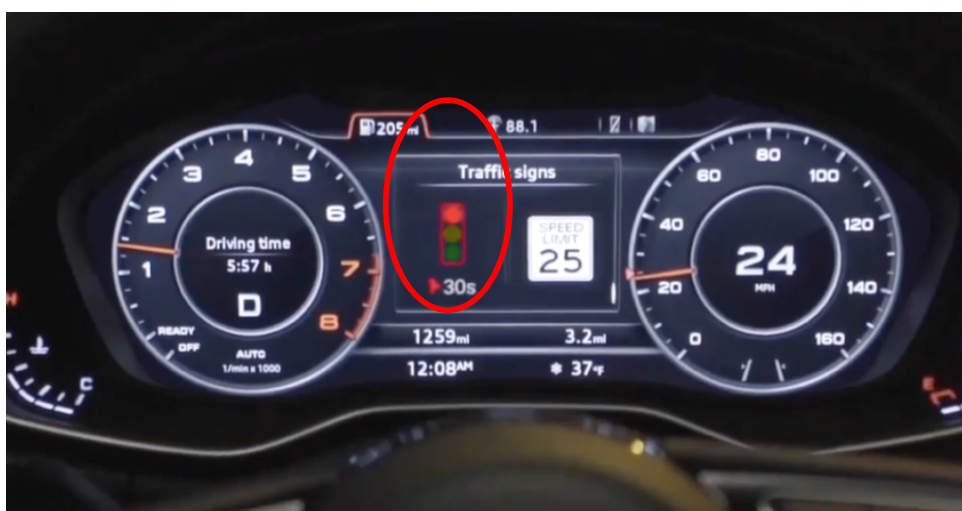


Figura 9: comunicazione del time to green, veicolo Audi

Il sistema si basa su un complesso algoritmo analitico che è in grado di prevedere esattamente il comportamento dei semafori, ricevendo i dati da tre diverse fonti: dal programma di controllo dei semafori stessi, dal computer che gestisce il traffico con i dati ricevuti in tempo reale e, infine, dalla combinazione dei dati ricevuti da telecamere, strisce sensibili inserite nella superficie stradale, percorsi di bus e tram, pulsanti sui semafori premuti dai pedoni correlati ai dati storici.

Inoltre, l'algoritmo si migliora costantemente e impara come si evolve il volume del traffico, per esempio raggiungendo i suoi picchi la mattina presto con gli spostamenti dei pendolari oppure intorno a mezzogiorno, quando chiudono le scuole.

Anche Jaguar Land Rover sta mettendo a punto la tecnologia Vehicle-to-Infrastructure (V2I) per ottimizzare i flussi di traffico e cavalcare l'onda verde dei semafori, però è ancora in fase di sperimentazione.

Il nuovo sistema denominato Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA) è un esempio di quello che può fare la tecnologia Vehicle-to-Infrastructure, che diventerà sempre più efficace e necessaria per i veicoli a guida autonoma.

Connette l'auto alla rete dei semafori, ci dialoga, calcola il percorso e restituisce al guidatore la velocità da mantenere per sfruttare il flusso dell'onda verde, ovvero trovare tutti i semafori verdi.

Di fatto, il sistema suggerisce al guidatore la velocità giusta per non incontrare un semaforo rosso, riducendo le congestioni stradali diminuisce anche i consumi di carburante e di conseguenza le emissioni nocive.

La tecnologia V2I eviterà ai guidatori di accelerare improvvisamente per non rimanere bloccati con il rosso e migliorerà la qualità dell'aria grazie alle minori emissioni. L'obiettivo è di creare un flusso scorrevole del traffico, con meno ritardi e meno stress perché ridurrà drasticamente il tempo sprecato ai semafori.

Per assicurare città più sicure e meno congestionate, il sistema GLOSA si accompagnerà ad altre misure per ridurre il tempo nel traffico, come l'Intersection Collision Warning (ICW) che avvisa i conducenti quando non è sicuro procedere ad un incrocio, se altre vetture sono in avvicinamento dalle strade adiacenti.

4.4 Innovazione nella ricerca

Complessivamente, in letteratura sono stati riportati risparmi di energia ed emissioni compresi tra il 2% e il 70% e risparmi sui tempi di viaggio compresi tra il 2% e il 68% per quanto riguarda gli impatti della guida ecologica dinamica sull'efficienza dei viaggi, l'efficienza energetica e l'ambiente

In sintesi, molti studi hanno analizzato e confermato i benefici ottenuti dall'uso dei sistemi GLOSA e delle auto connesse. I vantaggi sono sia per gli automobilisti che risparmiano in tempo grazie a code meno lunghe e sia per l'ambiente in termini di emissioni e consumo carburante.

In questa ricerca, invece, vengono analizzate varie tipologie di incrocio che possono essere presenti in una città per trovare in si ottengono i maggiori benefici a basse penetrazioni.

In questo modo, conoscendo la struttura dell'intersezione, il traffico nell'ora di punto di un incrocio e la distanza tra un semaforo e il successivo, che corrisponde alla distanza disponibile per l'invio della comunicazione della velocità, sarà possibile associare ad ogni scenario simulato un'intersezione realmente esistente in una città, in modo da individuare da quali incroci iniziare ad installare tale tecnologia.

5

ELEMENTI COSTITUTIVI DELLA SIMULAZIONE

Per studiare i miglioramenti ottenuti dall'uso della tecnologia V2I è stato utilizzato il software di simulazione VISSIM, attraverso il quale si possono ottenere innumerevoli dati come il livello di servizio della carreggiata, la lunghezza media della coda e il perditempo medio per ogni corsia, inoltre, la ricerca ha aiutato a simulare e a prevedere il comportamento del guidatore, quindi attraverso modelli di emissioni e consumi si è riusciti a prevedere il consumo di carburante e i livelli di emissione di sostanze di scarico come CO, NO_x, VOC, ecc.

L'obiettivo della simulazione è quello di verificare quali intersezioni sono più idonee all'utilizzo dei semafori intelligenti in base alla loro geometria e al flusso di traffico e tra questi quantificare i miglioramenti apportati, variando i tassi di penetrazione. A questo punto sarà possibile creare delle categorie per ogni scenario a cui associare gli incroci esistenti in una città per somiglianza in modo da individuare da quali è meglio iniziare a installare tale tecnologia.

Nei seguenti sotto capitoli vediamo nel dettaglio la classificazione degli incroci, quali sono i parametri utilizzati per questo studio della simulazione tramite il sistema PTV VISSIM e il software di programmazione Python.

5.1 Classificazione incroci

Sulla base della classificazione delle strade prevista dal Codice della Strada e secondo il D.M. "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", i nodi di interconnessione possono concettualmente rappresentarsi come gli elementi di una

matrice simmetrica 8x8, secondo gli otto tipi di strade, quattro per l'ambito extraurbano e quattro per l'ambito urbano, tale matrice viene riportata nella Figura 10, dove troviamo tutti i possibili nodi di intersezione fra due strade (o punti simbolici). Nella matrice si distinguono nodi omogenei, che connettono strade dello stesso tipo, e nodi disomogenei, che connettono strade di tipo diverso. Nei primi (nodi omogenei) sono sempre consentite connessioni che realizzano il trasferimento dei flussi da una strada all'altra, nei secondi (disomogenei), per ragioni di sicurezza e funzionalità, non sempre la realizzazione della connessione dei flussi di traffico è ammessa. Pertanto alcune intersezioni, nelle quali è presente una grande differenza fra i livelli gerarchici delle strade confluenti, vengono considerati non ammissibili.

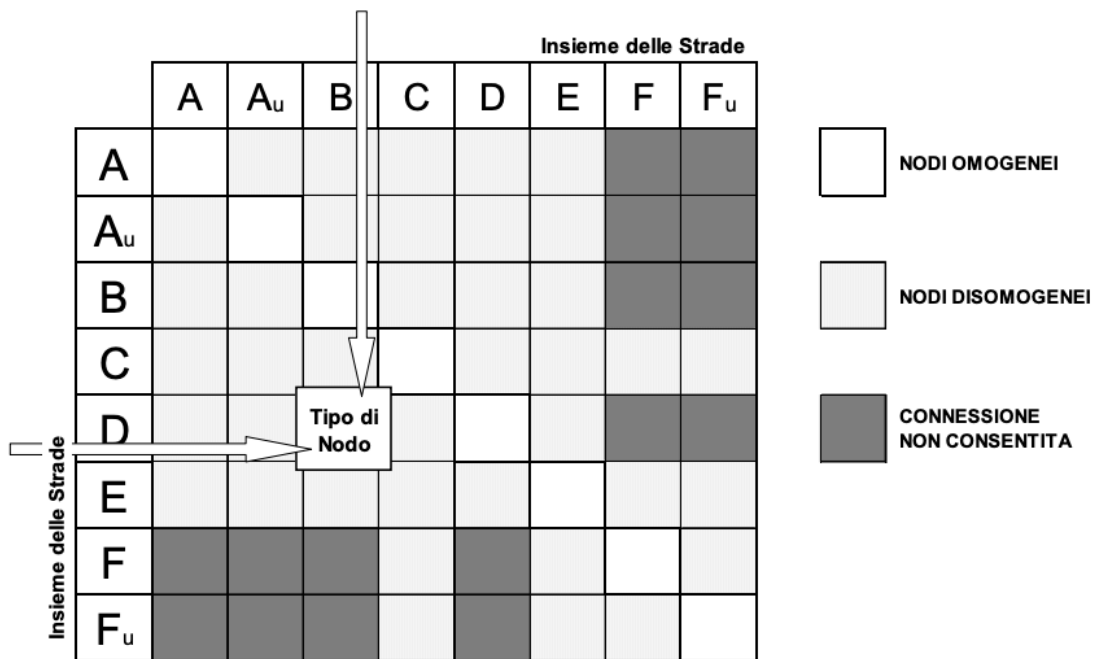


Figura 10: matrice simbolica per rappresentare tutti i possibili nodi di intersezione

Laddove la connessione è ammessa, è possibile distinguere diverse tipologie di nodo in relazione alla possibilità o meno che in corrispondenza del nodo si verificano punti di conflitto di intersezione. Nel caso di nodo in cui le strade confluenti siano tutte a carreggiate separate, non sono ammessi punti di conflitto di intersezione e la connessione

sarà risolta con uno svincolo, per esempio le autostrade, ammettendo eventualmente per le sole correnti di svolta manovre di scambio. Laddove le strade che convergono nel nodo sono ad unica carreggiata l'intersezione potrà essere risolta a raso (nodo di tipo 3), altrimenti l'incrocio va risolto sfalsando i livelli (nodo di tipo 2). Nella figura 11 vediamo com'è possibile schematizzare questo concetto.

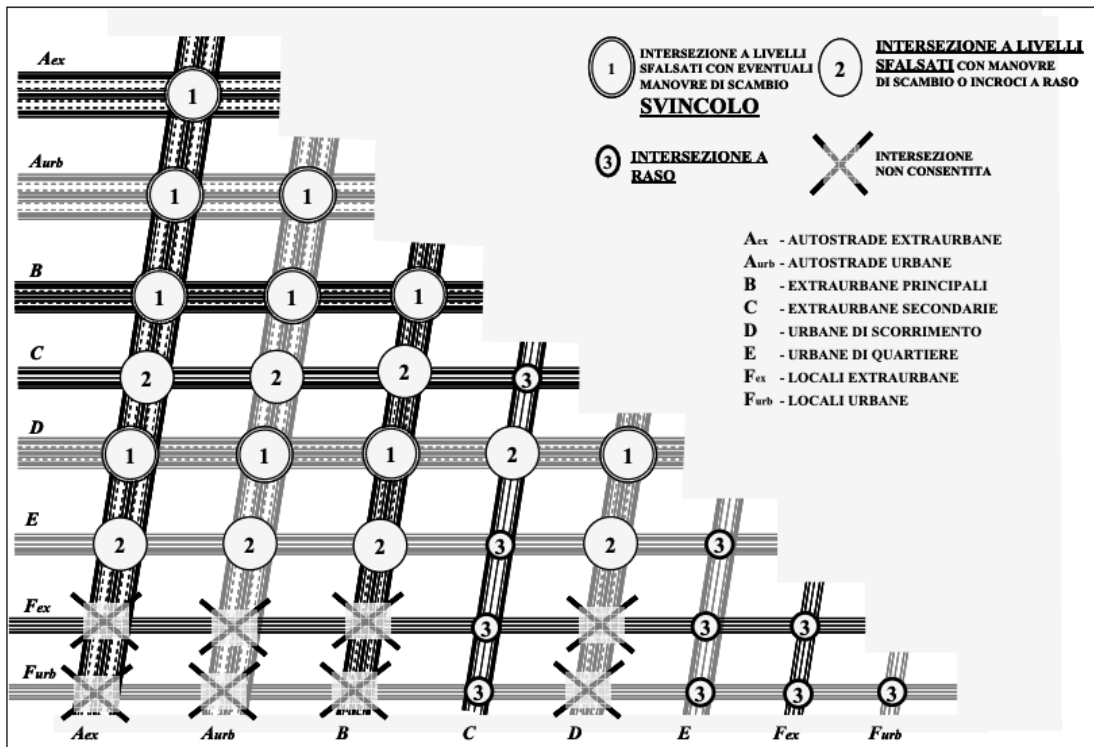


Figura 11: schema delle intersezioni ammesse nella rete stradale

L'insieme degli incroci forma la rete stradale. Dal punto di vista "gerarchico" la rete è classificata in tre livelli:

1. Rete primaria: rete stradale che mette in comunicazione l'area metropolitana e le sue principali infrastrutture (sistema aeroportuale e fieristico) con il resto del territorio nazionale e europeo e che collega le maggiori polarità dell'area metropolitana; sono caratterizzate da una forte componente di traffico di transito o comunque di scorrimento, dalle lunghe/medio distanze e da elevata capacità di

trasporto; elevata la componente di traffico pesante; assenti i pedoni, le biciclette e i ciclomotori, che non sono ammessi.

2. Rete principale: rete stradale che più riguarda il sistema delle comunicazioni fra le principali polarità e servizi dell'area metropolitana oltre che con i capoluoghi confinanti; i movimenti serviti sono in parte di scorrimento sulle lunghe distanze, ma prevalentemente di distribuzione dalla rete primaria a quella secondaria e alla rete locale; gli spostamenti sono soprattutto di media lunghezza e le componenti di traffico ancora limitate, anche se le componenti più deboli sono protette (attraversamenti pedonali protetti, piste ciclabili separate dalla carreggiata). Viene articolata in due classi
3. Rete secondaria: ha come principale funzione quella di penetrazione nei territori compresi nella maglia principale, con ridotte distanze di percorrenza. Anche per la rete secondaria sono previsti due classi. I volumi di traffico sono medio/bassi, a servizio di tutte le componenti di traffico.

Per la simulazione verranno analizzati solo incroci omogenei della rete secondaria, quindi le simulazioni saranno formate da un'intersezione a quattro rami, verranno valutati principalmente due macro scenari, il primo in cui ogni ramo è composto da una singola corsia e il secondo in cui ogni ramo è composto da due corsie, in entrambi i casi tutte le svolte saranno consentite.

5.2 Simulazione tramite il software VISSIM

Per ottenere risultati affidabili calibrati sul campo, un contributo significativo è dato dall'integrazione dell'algoritmo GLOSA in una piattaforma VISSIM V2I che fornisce ulteriore validità ai risultati considerando che tale sistema è ritenuto uno dei più avanzati strumenti di micro simulazione del traffico.

I test vengono eseguiti su una rete di traffico le cui metriche delle prestazioni di simulazione sono calibrate e convalidate per assomigliare a quelle osservate sul campo. In aggiunta, è stato utilizzato un modello completo di emissione modale per stimare con precisione le emissioni e il consumo di carburante.

Dai precedenti studi, riportati nel capitolo precedente, si evince che l'utilizzo del sistema GLOSA porta molti miglioramenti a livello di perditempo medio, lunghezza di coda media, consumo di carburante ed emissioni. Tali miglioramenti aumentano con il crescere del livello di penetrazione dei veicoli connessi CV.

Andiamo ora ad analizzare nel dettaglio i parametri più importanti che rappresentano le ipotesi alla base della simulazione come la scelta del flusso veicolare, la configurazione della rete stradale, il comportamento alla guida, l'analisi della velocità e il ciclo semaforico.

5.2.1 Studio del flusso veicolare

Quando si parla di flusso di traffico all'interno della simulazione si intende quello nell'ora di punta quando l'incrocio è più congestionato, così da valutare i miglioramenti nella situazione più critica. Invece durante l'ora di morbida si ha una diminuzione del flusso che porta ad ulteriori miglioramenti.

La composizione del traffico veicolare di base in ogni scenario è data da:

- veicoli a due ruote, come bici scooter e moto per un totale di 200 veicoli/ora;
- mezzi di trasporto collettivo come tram o autobus in base al tipo di incrocio per un totale di 10 mezzi all'ora;
- automobili che, in base al tasso di penetrazione, si dividono in auto comun e auto connesse CV, per un totale di 500, 600, 700 o 800 auto all'ora in base ai vari scenari.

I valori di flusso indicati sono da intendersi per ogni ramo dell'intersezione.

In questa simulazione il tasso di penetrazione non viene calcolato come percentuale su tutti i veicoli che compongono il traffico ma solo in relazione alle automobili, quindi gli altri utenti come bici, scooter, moto o autobus non rientrano in questo conteggio.

Le svolte sono consentite in ogni direzione, tra le tre scelte viene privilegiata la direzione dritta, seguita da quella verso destra e infine quella verso sinistra.

Quando questi scenari verranno associati alle intersezioni realmente esistenti in una città questo valore rappresenta un vincolo fisso per la fase di assegnazione ad una categoria.

5.2.2 Configurazione della rete stradale

Verranno analizzati due settori, ovvero l'ambito urbano con strade formate da una sola corsia e l'ambito suburbano con due corsie per senso di marcia.

Uno dei parametri principali che vengono variati nella formulazione degli scenari è la distanza a cui viene fornita l'informazione della velocità da raggiungere, tale misura corrisponde all'effettiva lunghezza della corsia in cui si immettono i veicoli all'interno della simulazione.

Allo stesso modo, quando sarà effettuata l'associazione alle intersezioni reali di una città questo valore rappresenterà la distanza tra un semaforo e il successivo, quindi simboleggia anch'esso un vincolo fisso.

5.2.3 Definizione dello stile di guida

Il software permette di modellare lo stile di guida in base ai veicoli in modo tale da ritrovare condizioni simili alla realtà. Vediamo alcuni tra i parametri del comportamento di guida che sono stati utilizzati in questa simulazione:

- il modello di accodamento;
- il comportamento di cambio corsia;
- il comportamento agli impianti semaforici;
- l'accelerazione e la decelerazione massima consentita.

Per ciascuna classe di veicoli, è possibile assegnare un insieme di valori che vanno a definire il loro atteggiamento alla guida, per esempio i veicoli due ruote, come bici scooter e moto, potranno sorpassare gli altri veicoli anche in presenza di una corsia per senso di marcia, inoltre, sia le auto comuni che quelle connesse avranno i tempi di reazione e il fattore decisionale in linea con la guida manuale.

Per ottenere la massima somiglianza con la realtà il modello è stato calibrato secondo precedenti studi che hanno confrontato i dati e i risultati ottenuti dalla simulazione con quelli reali derivati da un esperimento sul campo con veicoli connessi testati in condizioni di traffico reali, per ottenere la conformità dello stile di guida considerando i consigli della velocità da mantenere.

5.2.4 Analisi della velocità

Come ipotesi alla base della simulazione si ha che i conducenti delle auto connesse modifichino subito la propria velocità appena questa viene comunicata dal sistema rimanendo comunque un'auto a guida manuale. Quindi nei limiti delle accelerazioni o decelerazioni definite dal comfort di guida, il conducente modifica la sua velocità fino a mantenere quella indicata.

In un contesto reale, a differenza della simulazione, sarà a discrezione del conducente conformarsi o meno ai consigli sulla velocità proposti. Questa ipotesi imposta in questa situazione avverrà anche nella realtà perché la mancata variazione dell'andatura da parte degli automobilisti, ovvero il mantenimento di una velocità maggiore, risulta controproducente per i conducenti stessi.

Nel caso in cui il veicolo riesce a passare con la fase di verde corrente, il sistema comunica la velocità minima per passare, quindi questa può essere maggiorata. Invece nel caso in cui l'auto non riesca a passare con la fase corrente il sistema comunica la velocità massima da mantenere in modo da arrivare al semaforo quando quest'ultimo diventa verde. Quindi se il conducente procede con una velocità maggiore esso dovrà fermarsi al semaforo invece seguendo le indicazioni del sistema potrà evitare di fermarsi.

Un'altra considerazione molto importante va fatta a riguardo alla velocità minima da comunicare ai veicoli connessi, perché minore è la distanza a cui viene data l'informazione maggiore sarà la probabilità di comunicare una velocità molto bassa, quindi si è deciso di impostare la velocità minima a 15 km/h.

Con questa imposizione potrà capitare la situazione in cui un veicolo arrivi al semaforo durante la fase di rosso e che quindi dovrà arrestarsi e ripartire successivamente.

Questa situazione unita ad un tasso di penetrazione molto basso può portare al caso in cui si crei una lunga coda su un ramo o addirittura su tutti i rami di un'intersezione, superando la capacità dell'incrocio e andando ad occupare anche l'intersezione antecedente, portando al collasso della rete stradale.

Quindi in un contesto con tali caratteristiche il sistema di comunicazione V2I non riesce ad apportare benefici, per ottenere miglioramenti bisognerà aumentare il tasso di penetrazione, maggiore è la criticità della situazione maggiore dovrà essere il tasso.

5.2.5 Descrizione del ciclo semaforico

Per determinare l'impianto semaforico è stato utilizzato il modulo aggiuntivo interno a VISSIM chiamato Vissig, che si serve di un editor grafico per definire le fasi del semaforo.

Dato che il settore di questo studio riguarda principalmente l'ambito urbano si è scelto di utilizzare un ciclo semaforico di 60 secondi con andamento alternato tra la direzione Nord-Sud e Est-Ovest in cui la fase di verde ha una durata di 24 secondi seguita da una fase di arancione di 4 e infine una fase di tutto rosso di 2 secondi per smaltire i veicoli rimasti nell'incrocio.

Per una facile comprensione visiva si può usufruire del diagramma luci fornito dal modulo aggiuntivo, come mostrato nella figura 12 sottostante.

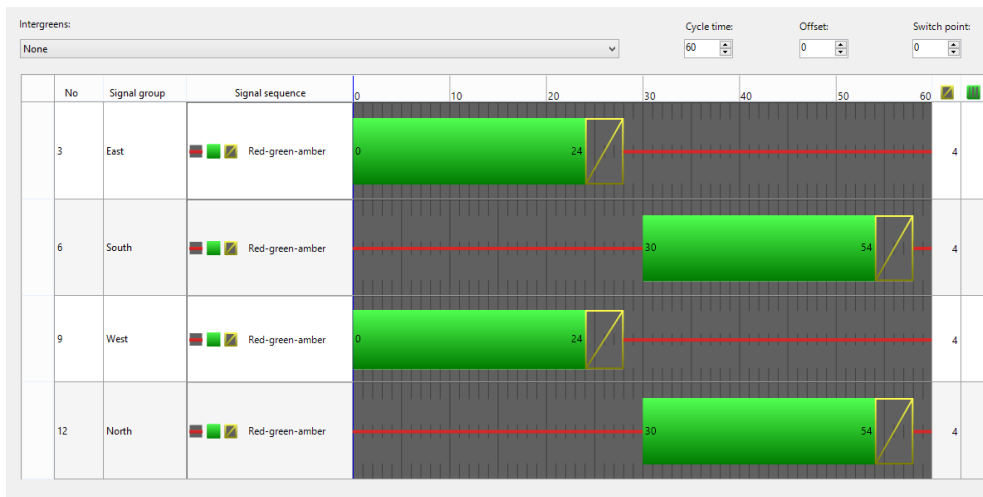


Figura 12: schema del ciclo semaforico da 60'

In aggiunta, per valutare quale fosse la situazione migliore, è stato realizzato uno scenario con ciclo semaforico da 90 secondi con le stesse caratteristiche dell'incrocio che ha ottenuto i maggiori benefici dall'uso della tecnologia di comunicazione V2I per un confronto ottimale.

Tale ciclo è composto da 38 secondi di fase di verde, 5 secondi di fase di giallo e 2 secondi di tutto rosso, figura 13.

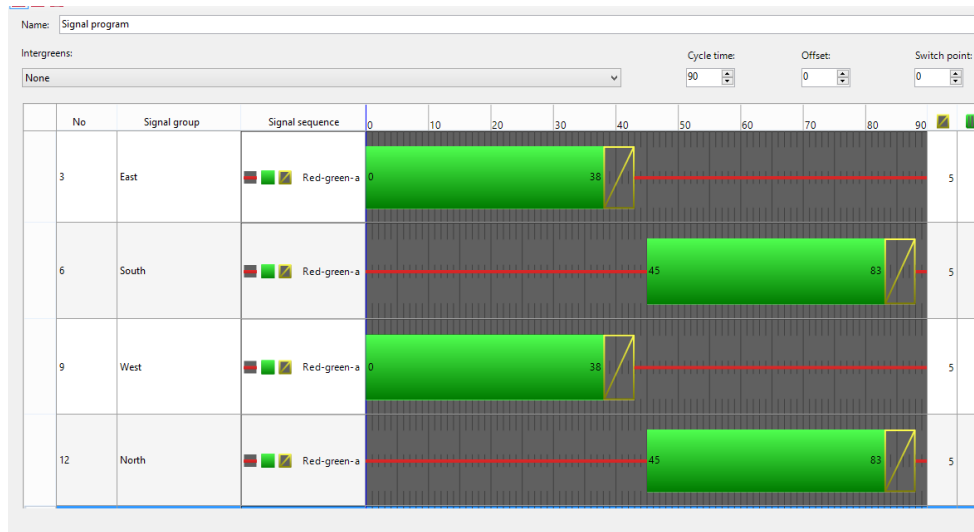


Figura 13: schema del ciclo semaforico da 90'

5.3 Utilizzo del linguaggio di programmazione Python

Vediamo come è stato utilizzato questo programma all'interno della simulazione per lo sviluppo della sezione relativa al calcolo alla comunicazione tra il semaforo e le auto connesse.

VISSIM dispone di un modulo per l'utilizzo di ambienti di programmazione esterni come MatLab, Python, JavaScript ed Excel. Per questa simulazione ho deciso di affidarmi all'utilizzo di Python per sviluppare, attraverso un codice, la sezione relativa al calcolo della velocità ottimale e l'invio di tale informazione.

I dati di input che riceve il sistema sono la durata delle fasi del ciclo semaforico e la distanza a cui viene comunicato il dato, quindi viene calcolata la velocità che permette all'auto di attraversare l'incrocio durante la fase di verde.

Tale calcolo tiene conto del fatto che sussiste una differenza tra la velocità a cui sta procedendo il veicolo e quella ottimale, quindi conteggia anche il tempo necessario per raggiungere il valore desiderato considerando i valori di accelerazione e decelerazioni definiti dal comfort di guida.

Il sistema si basa su un algoritmo che permette l'elaborazione e il calcolo di due valori di velocità:

- quella minima per attraversare l'incrocio durante la fase di verde corrente, il veicolo deve procedere ad una velocità uguale o superiore, se invece avanza più lentamente, non riuscirebbe a transitare con il verde attuale;
- quella massima per arrivare al semaforo all'inizio del prossimo ciclo di verde, il conducente deve mantenere un valore di velocità uguale o minore, se invece il veicolo avanza più velocemente arriverà al segnale durante il rosso.

Una volta effettuato questo conto il sistema confronta il primo dato con i limiti di velocità della strada e se questo non eccede tale vincolo verrà comunicato, in caso contrario verrà inviato il secondo dato.

Il calcolo può essere effettuato sia dal sistema di terra dei semafori intelligenti sia dal sistema di bordo del veicolo stesso.

Come risultato finale il guidatore vedrà il valore della velocità ottimale da mantenere sul cruscotto del veicolo, che rappresenta l'interfaccia uomo macchina HMI (Human-Machine Interface).

6

FORMULAZIONE DEGLI SCENARI

Nel seguente capitolo vengono illustrati i passaggi effettuati per la formulazione degli scenari che sono stati presi in esame.

L'obiettivo è quello di valutare e quantificare i benefici ottenuti dal sistema di comunicazione GLOSA tra veicolo e infrastruttura, V2I, eseguendo anche un confronto per riscontrare la situazione migliore, con l'obiettivo di associare per somigliare gli scenari con incroci esistenti in una città.

Vediamo nel dettaglio le caratteristiche generali della simulazione che rimangono fisse alla base di ogni scenario.

Nella rete stradale viene studiata un'intersezione a quattro bracci, per semplicità verranno chiamati North, Est, South e West. Ogni ramo è composto da due archi, il primo più breve dove vengono inseriti i veicoli che vanno a comporre il flusso e il secondo di una lunghezza variabile in base allo scenario, che rappresenta l'effettiva corsia dove avviene la comunicazione.

Come già anticipato le svolte in tutte le direzioni sono consentite con le dovute regole di precedenza stabilite dal Codice della Strada, esclusa la manovra di inversione a U.

Sono stati analizzati diversi scenari andando a variare più elementi:

- la geometria, ovvero il numero di corsie per senso di marcia;
- i volumi di traffico inseriti in ogni ramo convergente all'intersezione;
- la lunghezza delle corsie, ovvero la distanza a cui viene data l'informazione della velocità ottimale che corrisponde allo spazio compreso tra un semaforo e quello dell'incrocio successivo
- la percentuale di penetrazione di auto connesse calcolato sul numero di auto presenti e non sul totale di veicoli;

Come primo passo viene fissata la geometria della rete, optando tra l'ambito urbano con una corsia e l'ambito suburbano con due corsie per ogni ramo, quindi poi viene definito il flusso di traffico che è composto da valori fissi di veicoli a due ruote e autobus e da dati variabili tra 500 e 700 auto l'ora nel settore urbano e tra 600 e 800 auto l'ora nel settore suburbano.

Per ognuna di queste categorie vengono analizzate diverse misure relative alla distanza a cui viene inviata l'informazione, partendo da un valore minimo dettato dalla funzionalità dell'incrocio, ovvero se si utilizza una misura inferiore, l'incrocio andrà al collasso soprattutto per valori di penetrazione bassi, superando la capacità dello stesso e andando ad intasare le intersezioni limitrofe.

Per ottenere code di lunghezza inferiore a quella delle corsie si dovrà avere un valore di penetrazione elevato e più viene diminuita la distanza a cui avviene la comunicazione più la percentuale di auto connesse dovrà essere maggiorato.

L'ultima variabile che viene modificata è appunto la percentuale di auto connesse rispetto alle auto presenti nel sistema. Sono stati analizzati 5 diversi valori di penetrazione, ovvero 0%, 25%, 50%, 75% e 100%.

Come brevemente anticipato nelle sezioni precedenti, in alcuni casi è stato ritenuto opportuno apportare delle modifiche a questi valori in relazione ai risultati che man mano si stavano ottenendo.

Per una veloce comprensione del procedimento seguito per l'elaborazione e la formulazione degli scenari, nella tabella 1 sottostante si evidenzia lo schema che rappresenta quanto descritto nella parte superiore.

<p>numero di auto/h</p>	<p style="text-align: center;">1 CORSIA</p>	<p style="text-align: center;">2 CORSIE</p>
<p>distanza a cui viene inviata l'informazione della velocità ottimale da mantenere</p>	<p>L 100, L 150, L 200, L 150, L 200, L 250, L 200, L 250, L 300</p>	<p>L 150, L 200, L 250, L 200, L 250, L 300, L 250, L 300, L 350</p>

Tabella 1: schema degli scenari studiati

Tra tutte le combinazioni possibili sono state trovate anche delle intersezioni non idonee all'utilizzo di questa tecnologia, in cui tale sistema non può essere applicato sia per problemi relativi al flusso di traffico, perché non arrecherebbe benefici elevati soprattutto a bassi tassi di penetrazione sia per vincoli legati alla composizione della rete e del ciclo semaforico, si ha proprio un'incompatibilità con certi tipi di geometria.

Per una migliore comprensione visiva, ad ogni categoria di veicolo è stato associato un colore per differenziarli:

- le auto comuni sono composte da diversi modelli in base alla casa automobilistica e vengono raffigurate con il colore nero;
- le auto connesse CV hanno un profilo più aerodinamico e sono rosse;
- l'autobus di linea viene rappresentato in blu;
- i veicoli a due ruote, visto che comprendono bici, scooter e moto, hanno colori misti ma si distinguono per la loro forma e dimensione.

Sono stati inseriti nella rete degli elementi che permettono la misurazione dei parametri necessari per la valutazione dei benefici ottenuti, questi componenti sono posizionati sia a livello dell'intersezione che a livello dei rami.

Gli scenari si possono raggruppare in due macro gruppi seguendo la prima grossa distinzione data dalla geometria, nei prossimi sotto capitoli vengono analizzati nel dettaglio queste sezioni e in aggiunta c'è una parte dedicata agli incroci non idonei.

6.1 Intersezione con una corsia

In questa sezione vengono raggruppati tutti gli scenari composti da una sola corsia per senso di marcia, figura 14.

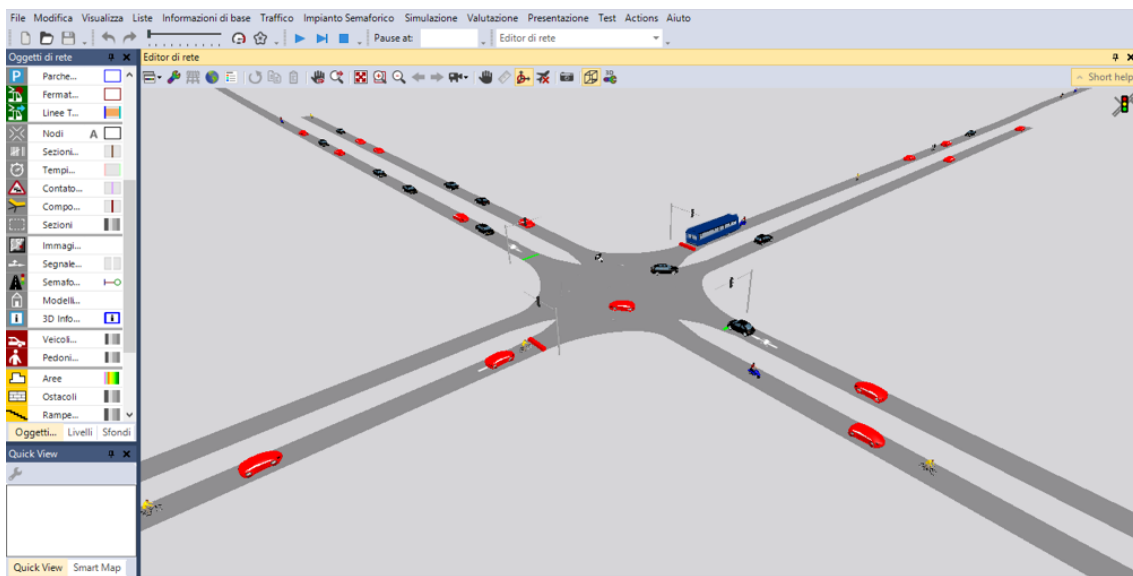


Figura 14: software VISSIM, intersezione a una corsia

Inizialmente, dopo aver inserito il flusso di traffico, il sistema divideva i veicoli nelle tre scelte di percorso, destr, dritto e sinistra, in modo equo ma avendo a disposizione solo una corsia per senso di marcia, i veicoli che svoltavano a sinistra bloccavano il passaggio ai veicoli successivi.

Quindi per questo motivo è stato deciso di prediligere la direzione dritta, seguita da quella a destra e in ultimo quella verso sinistra con un rapporto rispettivamente del 50%, 30% e 20%.

Un vantaggio, invece, della strada ad una corsia è quello del divieto di sorpasso. I veicoli comuni, non potendo sorpassare le auto connesse che procedono con un'andatura più lenta, si devono adeguare alla loro velocità, quindi come risultato si ha che anche i veicoli

che seguono quelli connessi avanzano alla velocità ottimale per superare l'incrocio durante la fase di verde, evitando così la fase di arresto e ripartenza al semaforo rosso. In questa situazione è come se la percentuale di vetture capaci di comunicare con i semafori fosse aumentata.

Nella figura 15 sottostante si nota infatti che nella direzione West si possono osservare più veicoli comuni fermi al semaforo durante la fase di rosso (auto nere), mentre nella direzione Est il primo veicolo (auto rossa) sta procedendo ad un'andatura più lenta per arrivare all'intersezione all'inizio della fase di verde, rallentando tutti i veicoli che la succedono.

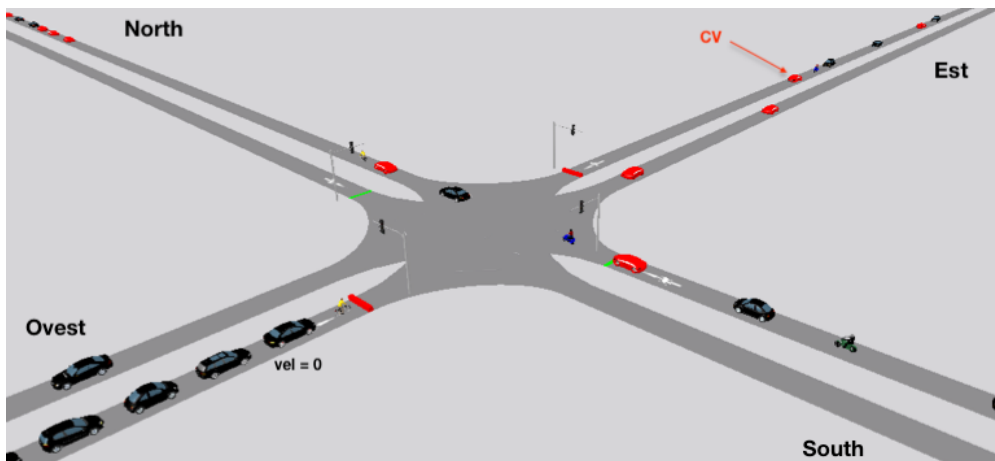


Figura 15: software VISSIM: effetto di un'auto connessa sui veicoli comuni

In questo modo i benefici si moltiplicano sia in termini di perditempo e lunghezza della coda sia in termini di consumo e inquinamento già a bassi livelli di penetrazione. Per questo motivo è stato deciso di indagare meglio i vantaggi apportati per basse percentuali di auto CV, aggiungendo step intermedi tra 0% e 25%.

Quindi solo per gli scenari composti da una sola corsia sono stati analizzati 9 diversi livelli: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 50%, 75% 100%.

Come anticipato nel capitolo precedente, per entrambi gli ambiti, è stato individuato lo scenario ottimale che apportava un valore percentuale più elevato in termini di benefici ed è stato confrontato con uno scenario con le stesse caratteristiche ma con delle piccole modifiche di altri parametri rispetto a quelli che sono stati variati in precedenza.

Per questo settore è stato scelto il paragone con due scenari differenti:

- un'intersezione con un ciclo semaforico di 90 secondi invece che 60;
- un'intersezione in cui la velocità ottimale comunicata ai veicoli connessi viene diminuita del 10% per tenere conto del fatto che ci potrebbero essere dei veicoli fermi in coda al semaforo, con due sotto gruppi, nel primo è stata mantenuta la velocità minima a 15 km/h, nel secondo è stata abbassata a 10 km/h.

6.2 Intersezione con due corsie

In questa sezione vengono raggruppati tutti gli scenari composti da due corsie per senso di marcia, per tutta il corridoio considerato, ovvero dal semaforo precedente a quello successivo, figura 16.

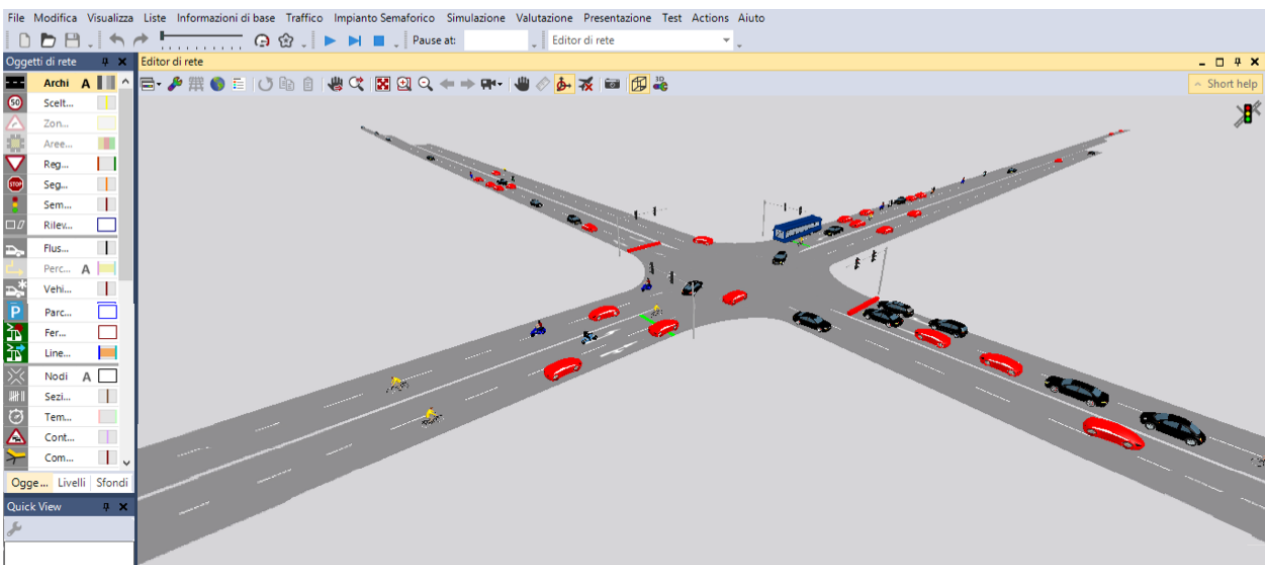


Figura 16: software VISSIM, intersezione a due corsie

La corsia di sinistra può essere usata anche dagli utenti che intendono procedere dritto, non è dedicata solo per la svolta a sinistra, però vale lo stesso ragionamento fatto nella sezione precedente, ovvero che i veicoli che devono svoltare a sinistra devono dare la precedenza a quelli nella direzione opposta, quindi si fermeranno al centro dell'intersezione bloccando la propria corsia e i veicoli che devono procedere dritto

useranno la corsia di destra. Anche in questo caso si è preferito optare per una suddivisione non equa delle scelte di percorso, mantenendo la stessa proporzione usata nelle intersezioni ad una corsia.

Nel ciclo semaforico la fase di verde rimane unica per tutte e tre le direzioni, non è presente nessuna svolta protetta.

In questo caso il sorpasso è consentito, ad esclusione del tratto in prossimità dell'intersezione, quindi le auto connesse non ostacoleranno più gli altri veicoli quindi, soprattutto a bassi valori di penetrazione, la probabilità di trovare veicoli fermi al semaforo è elevata.

Questa situazione non permette di ottenere quei grossi vantaggi ricavati dalla corsia singola quindi non sono stati aggiunti scenari con livelli di penetrazione intermedi.

Per il confronto effettuato in questo ambito è stato scelto uno scenario in cui la velocità massima dalla strada è di 70 km/h, per confrontarsi con un ambito extraurbano.

6.3 Analisi degli incroci non idonei

In questa sezione sono stati raggruppati gli scenari che sono stati ritenuti idonei per l'uso di questa tecnologia. I principali motivi di questa scelta sono due:

- problemi relativi al flusso di traffico;
- incompatibilità con il ciclo semaforico.

Nel primo caso rientrano tutti gli incroci in cui viene diminuita la distanza a cui viene data l'informazione della velocità ottimale in abbinamento con i vari valori di flusso di traffico. In altri termini, riprendendo la tabella 1 si può dire che per flussi di traffico di 500 veicoli l'ora non si può scendere sotto una distanza di 100 m dal semaforo, per 600 veicoli l'ora la distanza minima è 150 m, per 700 è 200, questo per quello che riguarda il caso di una corsia, lo stesso ragionamento si applica per le due corsie.

Come limite generale, si può affermare che se è presente l'immissione di una strada secondaria entro i 100 m dal semaforo, l'automobilista non fa in tempo a variare la propria velocità e seguire quella comunicata, quindi il sistema di comunicazione non porterebbe benefici e risulta inutile l'installazione di un semaforo intelligente.

Il secondo caso, invece, riguarda l'incompatibilità con certi tipi di cicli semaforici, ovvero quelli che prevedono una svolta protetta.

La fase di verde di una svolta protetta è molto breve, questo comporta la comunicazione di una velocità molto ridotta andando a scontrarsi con il limite della velocità minima di 15 km/h imposta inizialmente.

Anche rimuovendo questo vincolo, gli automobilisti, in condizione di guida manuale, non rispetterebbero questo limite così basso. Quindi si verificherebbe sempre l'arresto delle auto al semaforo e successiva ripartenza, perdendo tutti i benefici dati dall'assenza del fenomeno di start-and-stop.

In aggiunta, il caso più critico si verifica con l'ipotesi in cui la corsia dedicata alla svolta sia prevista solo negli ultimi 50 metri prima dell'incrocio, così facendo alle auto che svoltano a sinistra sarà comunicata una velocità inferiore rispetto a quelli che procedono dritti o a destra quindi si verifica l'effetto del fenomeno chiamato collo di bottiglia.

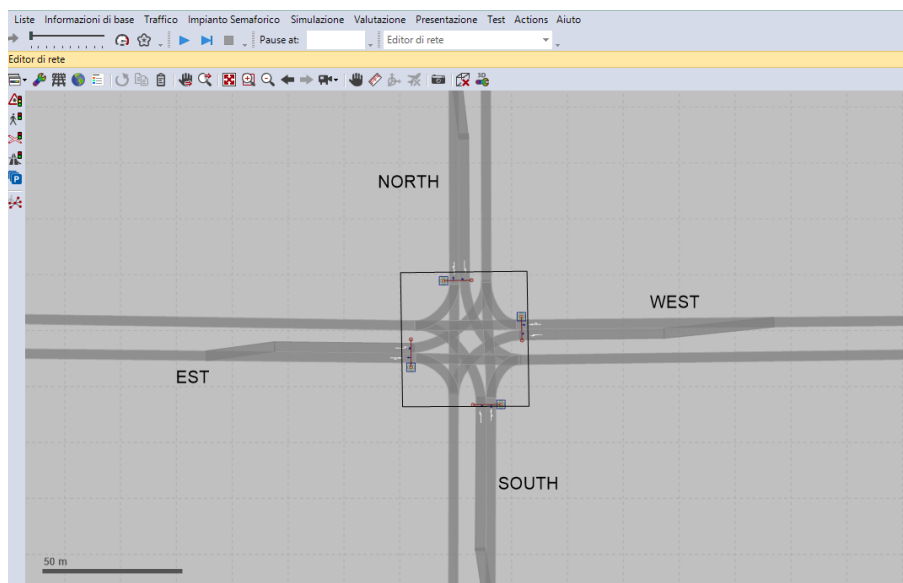


Figura 17: software VISSIM: geometria non idonea, vista 2D

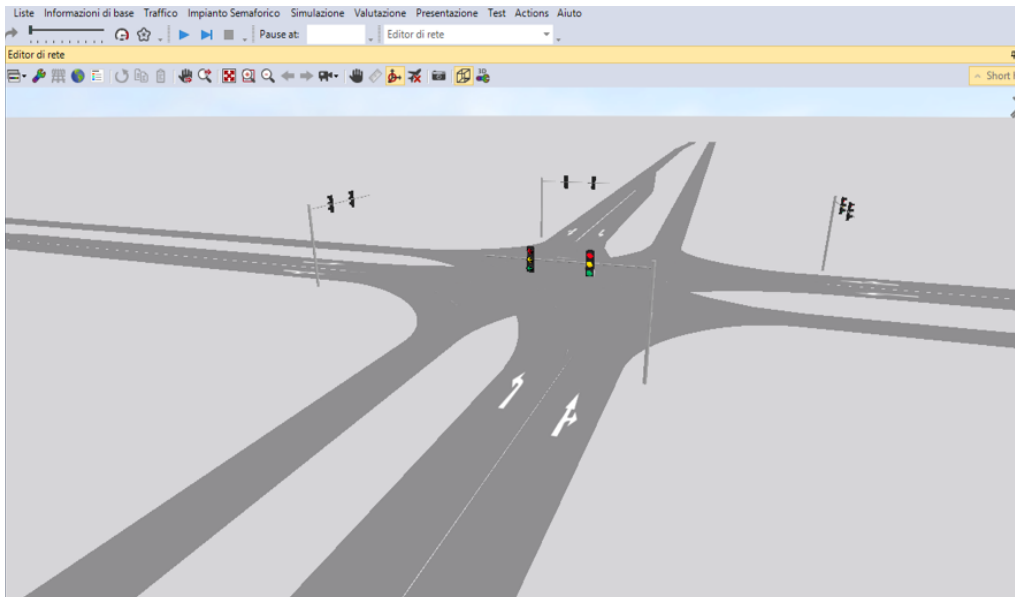


Figura 18: software VISSIM: geometria non idonea, vista 3D

Per comprendere meglio la configurazione dell'intersezione appena descritta, nelle figure 17 e 18 viene rappresentata la geometria nella vista 2D e 3D.

Per la svolta a destra protetta, invece, il ragionamento è opposto. La fase di verde della svolta è aumentata rispetto a quella della direzione dritta, quindi se è presente una corsia dedicata alla svolta, sufficientemente lunga, il sistema può essere applicato.

Se la corsia dedicata è prevista solo negli ultimi metri prima dell'incrocio, i benefici dati dal sistema Glosa saranno limitati a quelli della direzione dritta ma saranno comunque presenti.

Per questa sezione inerente alle svolte va fatta una precisazione, una delle ipotesi alla base della simulazione è che la comunicazione tra auto e semaforo è di tipo unilaterale, ovvero avviene solo l'invio della velocità da mantenere da parte del sistema al veicolo, non è presente nessuna informazione mandata dal veicolo, quindi il sistema non sa quale sarà la direzione che verrà presa dall'automobilista.

Le soluzioni proposte per questo problema sono due:

- si possono comunicare più velocità ottimali specifiche per ogni direzione in base alle diverse fasi di verde, indipendentemente da quale sarà intrapresa;

- si può studiare un sistema di comunicazione bilaterale in cui il sistema di bordo dell'auto invia le sue informazioni, nel rispetto della privacy, per avere indicazioni precise e studiate per il singolo veicolo.

7

RISULTATI OTTENUTI

In questo capitolo verranno riportati i risultati ottenuti, suddivisi in base ai macro gruppi citati primi.

Per il calcolo dei dati necessari per questo studio, il software di simulazione Vissim si serve di fattori di conteggio specifici per ogni dato che si vuole analizzare. In questa simulazione sono stati usati gli elementi denominati:

- Nodi
- Sezioni di rilievo
- Tempi di percorrenza veicolare
- Contatori di coda
- Composizioni di flusso
- Percorsi veicolari

A livello del nodo è possibile valutare il livello di servizio dell'intersezione, la lunghezza della coda attuale durante la simulazione e di quella massima, in aggiunta vengono determinati anche i valori del consumo di carburante e delle emissioni delle sostanze di scarico, come il monossido di carbonio CO, l'ossido di azoto NOx e i composti organici volatili, VOC.

Nella sezione di rilievo troviamo i dati relativi alla distanza percorsa, con associati i valori di accelerazione, velocità media aritmetica e velocità media armonica.

Con i tempi di percorrenza veicolare si ottengono i valori delle fermate, ovvero il numero medio delle fermate effettuate per veicoli, senza contare quelle dovute alle fermate del trasporto pubblico. Inoltre si ricavano i valori di perditempo medio, sottraendo il tempo di percorrenza reale al tempo di percorrenza ideale, che si avrebbe in assenza di altri veicoli e di semafori, o di qualsiasi altro motivo di arresto del veicolo.

Il contatore di coda, oltre a ripetere i dati del valore attuale della coda e di quella massima, trasmette anche la lunghezza della coda media, dato fondamentale per il confronto degli scenari.

La composizione di flusso ci permette di conoscere in tempo reale durante la simulazione tutti i dati relativi a posizione, ovvero la distanza dal semaforo e la corsia occupata, la velocità attuale e quelle ottimali per passare con le fasi di verde, attuale o futura e l'accelerazione o decelerazione.

Infine i percorsi veicolari permettono di stabilire gli itinerari per la realizzazione delle matrici origine-destinazione OD.

Tutti questi dati sono stati esportati del software VISSIM ad Excel, in modo da rappresentarli in modo chiaro e di più facile comprensione attraverso tabelle e grafici.

Nella figura 19 troviamo un esempio di dati ricavati dal programma di simulazione

Count	Movimen...	Movime...	Simul	LunghCoda	LunghMax...	Veic(Tutti)	Valor...	Perditempo...	Perditemp...	EmissioniCO	EmissioniNOx	EmissioniVOC	ConsumoCa...
1	1: EST	4: north	1	18,56	93,90	7	2	10,85	3,52	7,384	1,437	1,711	0,106
2	1: EST	6: west	1	18,56	93,90	26	2	19,43	3,25	39,305	7,647	9,109	0,562
3	1: EST	8: south	1	18,56	93,90	25	2	19,13	4,82	33,322	6,483	7,723	0,477
4	3: NORTH	2: est	1	11,00	109,84	28	2	13,35	2,49	29,184	5,678	6,764	0,418

Summary row at the bottom of the table:

00:04:06,50	6,0	93 + 0	3,4 (317)
-------------	-----	--------	-----------

Figura 19: dati ottenuti dal software Vissim

Mentre nella tabella 2, 3 e 4 vediamo un esempio dati ordinati e raggruppati con Excel, procedimento che è stato effettuato per ogni scenario.

n	simul	numero arco	accel [m/s ²]	distanza [m]	lunghezza totale [m]	n veich	durata coda [s]	velocità media aritmetica [km/h]	velocità media armonica [km/h]	tasso occupazione [%]
1	0-3600	1	0,78	247	3,46	772	49,17	24	14	17%
1	0-3600	3	0,69	234	3,44	774	80,60	23	12	19%
1	0-3600	5	0,56	247	3,42	772	90,48	22	8	58%
1	0-3600	7	0,69	186	3,48	774	73,03	23	9	23%
		MIGLIORAMENTI [%]		38%	64%	69%	58%	55%	55%	59%

Tabella 2: dati della simulazione relativi alla Sezione di rilievo

	da	a	lunghezza coda [m]	lunghezza coda max [m]	num veich	LdS	perditempo medio [s]	perditempo a fermo medio [s]	emissioni CO [g/km]	emissioni Nox [mg/m ³]	emissioni VOC [µg/m ³]	consumo carburante [l/km]
E-N	1: EST	4: north	83,02	252,48	163	5	95,79	42,98	589,43	95,23	113,43	10,00
E-W	1: EST	6: west	83,02	252,48	382	5	91,24	41,02	1211,01	196,71	234,31	17,46
E-S	1: EST	8: south	83,02	252,48	225	5	93,43	35,90	732,73	103,65	123,47	10,62
N-E	3: NORTH	2: est	134,80	239,22	227	6	99,94	65,15	805,02	156,63	186,57	11,52
N-W	3: NORTH	6: west	134,80	239,22	161	6	113,34	70,54	678,09	131,93	157,15	9,70
N-S	3: NORTH	8: south	134,80	239,22	381	6	99,79	64,66	1344,23	261,54	311,54	19,23
W-E	5: WEST	2: est	162,73	252,56	392	6	115,76	74,76	1582,31	307,86	366,72	22,64
W-N	5: WEST	4: north	162,73	252,56	218	6	112,00	73,59	846,04	164,61	196,08	12,10
W-S	5: WEST	8: south	162,73	252,56	159	6	123,75	78,78	714,29	138,97	165,54	10,22
S-E	7: SOUTH	2: est	122,77	191,07	176	6	100,30	62,99	651,28	126,72	150,94	9,32
S-N	7: SOUTH	4: north	122,77	191,07	380	6	89,63	57,51	1196,10	232,72	277,21	17,11
S-W	7: SOUTH	6: west	122,77	191,07	213	6	90,80	59,78	672,98	130,94	155,97	9,63
all			125,83	252,56	3077	6	95,33	60,15	10516,99	2046,22	2437,41	150,46
		MIGLIORAMENTI [%]	26%	74%		6	40%	34%	47%	48%	48%	46%

Tabella 3: dati della simulazione relativi al Nodo

RAMO	lunghezza [m] coda	lunghezza coda max [m]	fermate	contatore coda [m]
EST	82,75	252,16	1462	122,75
NORTH	134,37	238,75	2113	134,37
WEST	161,93	251,72	2465	161,93
SOUTH	122,33	190,59	1957	122,33
MIGLIORAMENTI [%]	72%	25%	55%	76%

Tabella 4: dati della simulazione relativi ai Contatori di coda

Utilizzando questi dati sono stati realizzati dei grafici a colonna per interpretare al meglio i valori ottenuti, come si vede in un esempio nel grafico 1 sottostante.

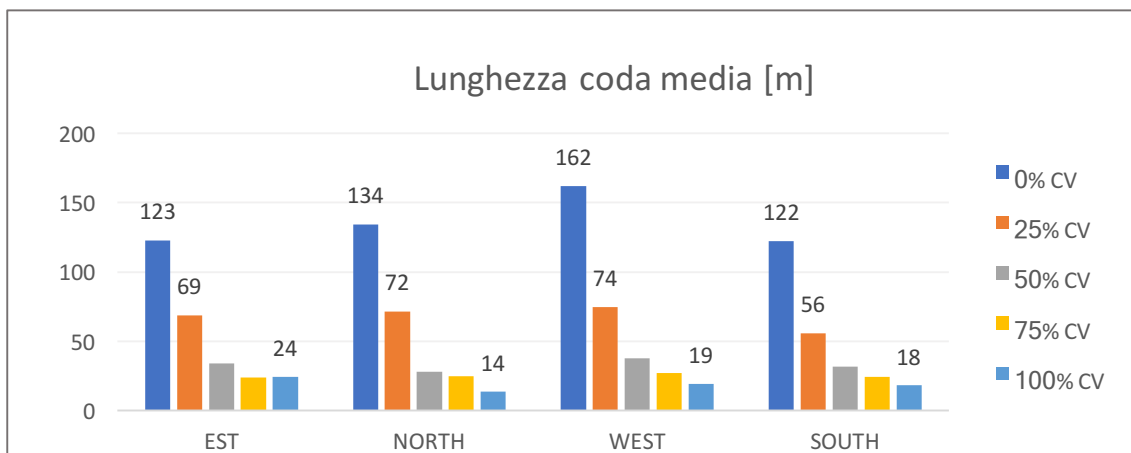


Grafico 1: esempio di grafico della lunghezza della coda

Questi grafici sono utili per valutare i risultati ottenuti in ogni scenario, con diversi valori di penetrazione, verranno poi calcolate le percentuali dei miglioramenti ottenuti per identificare l'intersezione migliore con cui poi verrà effettuato un confronto con scenari aggiunti con caratteristiche simili ma con piccoli particolari variati in base ai risultati ottenuti.

7.1 Risultati per intersezioni a una corsia

Le prove degli esperimenti di simulazione hanno mostrato che negli scenari di simulazione a corsia singola i vantaggi più cospicui del consiglio di velocità si sono stabilizzati su un tasso di penetrazione del mercato del 25%.

Al contrario, in scenari a più corsie in cui l'attività di cambio corsia dei veicoli convenzionali ha degradato le prestazioni del servizio di guida, saranno necessari tassi di penetrazione più elevati per ottenere gli stessi benefici.

Analizziamo per esempio lo scenario con 600 auto all'ora e una distanza di 150 m, a cui viene comunicata la velocità.

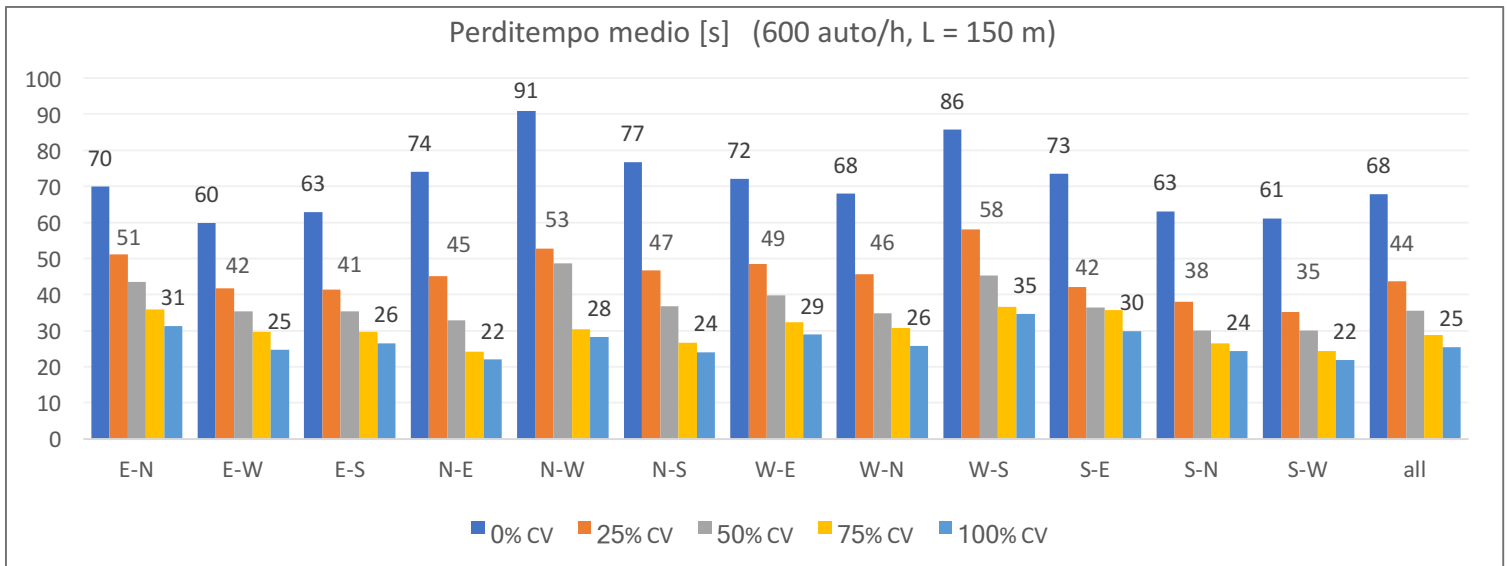


Grafico 2: valori di perditempo medio, 600 auto/h, L = 150 m

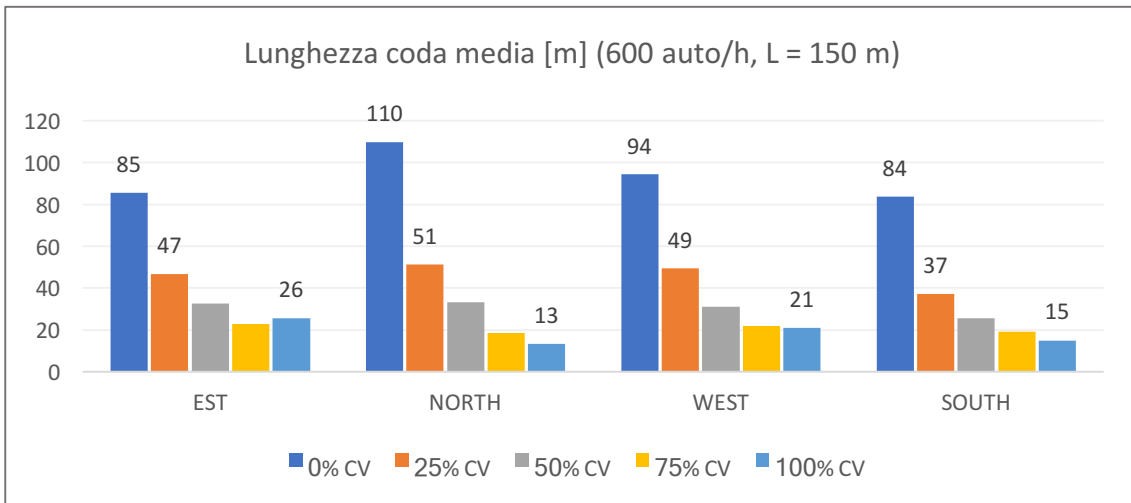


Grafico 3: valori di lunghezza della coda media, 600 auto/h, L = 150 m

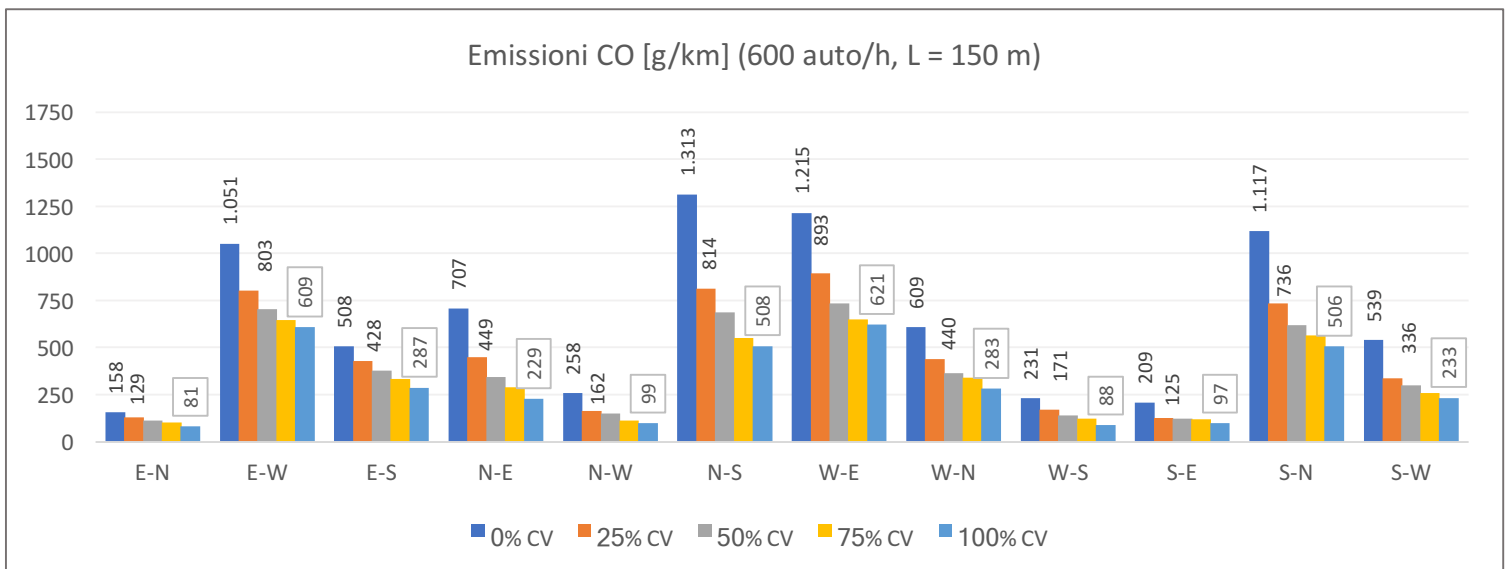


Grafico 4: valori di emissioni CO 600 auto/h, L = 150 m

Da questi grafici si possono notare due fatti principali:

- nell'intervallo tra 0% e 25% si ottiene il salto maggiore, quindi come menzionato precedentemente, è stata analizzata nel dettaglio questa fascia con un intervallo di indagine del 5%;
- la svolta a sinistra ha i valori di consumi ed emissioni molto bassi per via della divisione impostate tra le tre scelte di percorso citata nel capitolo precedente.

Vengono, quindi riportati i grafici riferiti alle basse percentuali di penetrazione.

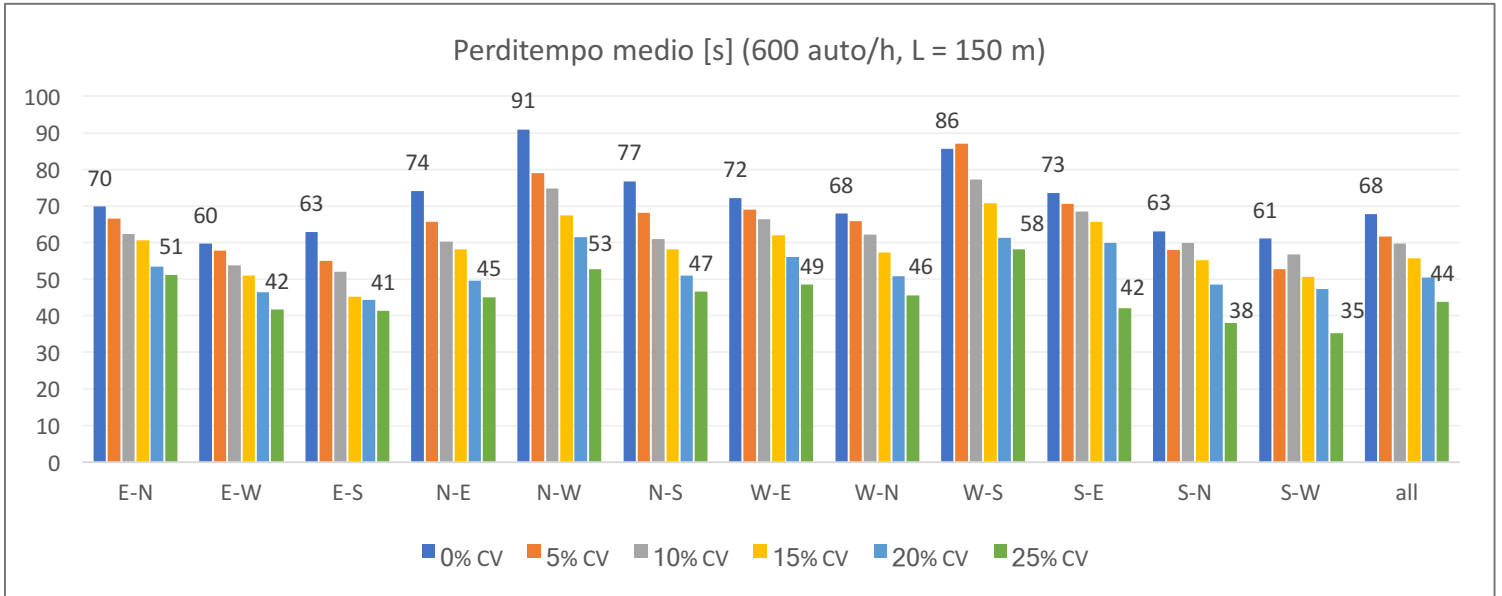


Grafico 5: valori di perditempo medio, 600 auto/h, L = 150 m

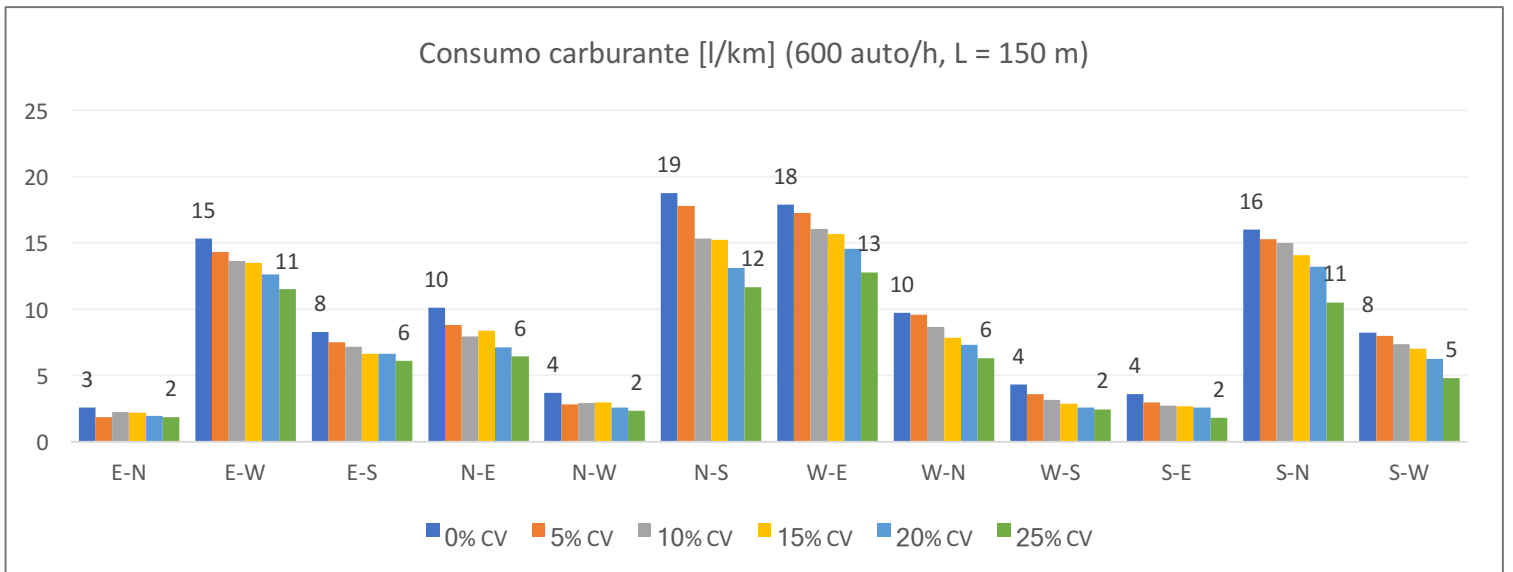


Grafico 6: valori di consumo carburante, 600 auto/h, L = 150 m

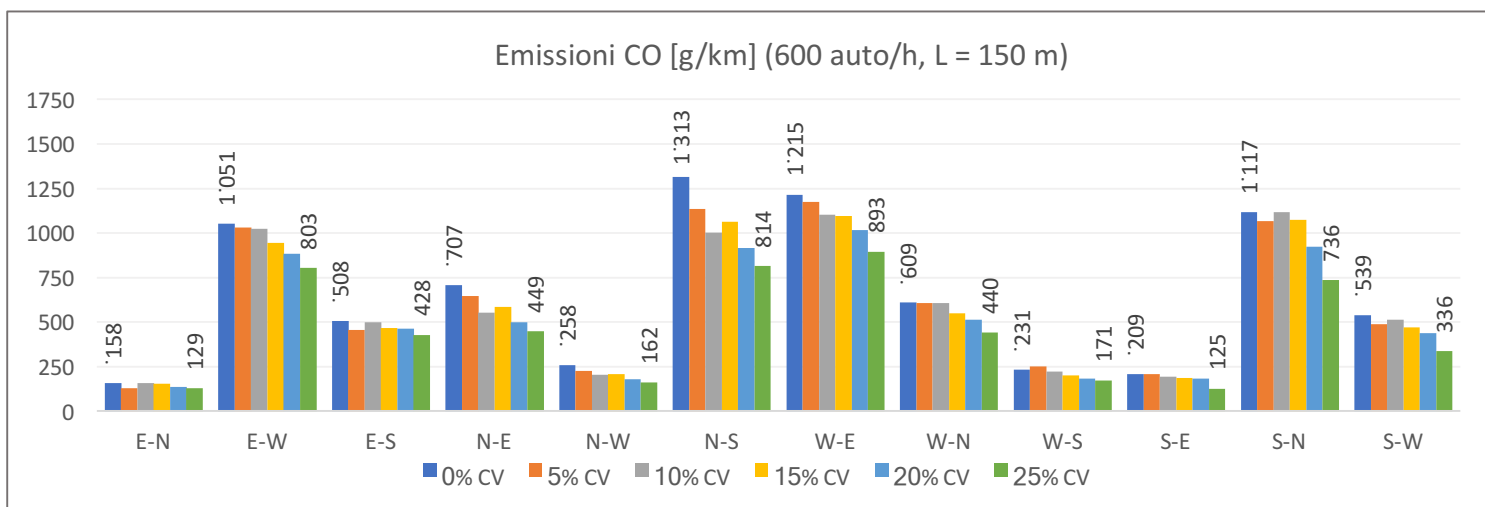


Grafico 8: valori di emissioni CO, 600 auto/h, L = 150 m

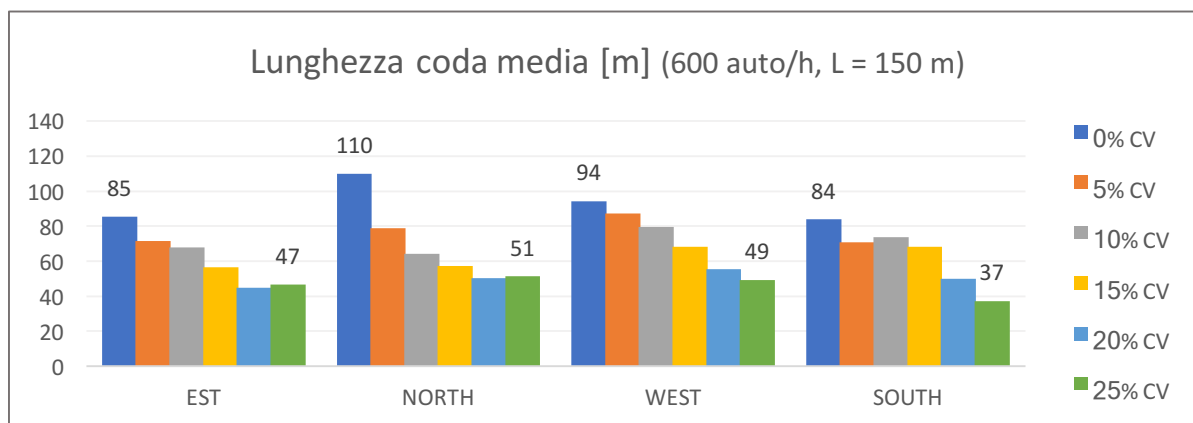


Grafico 7: valori di lunghezza di coda media, 600 auto/h, L = 150 m

Nella tabella 5 sono state raggruppate tutte le percentuali inerenti ai miglioramenti e benefici ottenuti.

MIGLIORAMENTI (600 auto/h, L = 150 m)								
	5% CV	10% CV	15% CV	20% CV	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	17%	22%	32%	46%	51%	67%	78%	85%
PERDITEMPO MEDIO [s]	7%	12%	18%	26%	36%	48%	57%	59%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	11%	15%	17%	25%	35%	44%	51%	52%
EMISSIONI CO2 [g/km]	6%	8%	11%	19%	30%	40%	47%	50%

Tabella 5: riassunto dei miglioramenti di 600 auto/h, L = 150 m

Questi grafici e tabelle sono stati realizzati per ogni combinazione di flusso di traffico, distanza di invio dell'informazione e tassi di penetrazione, così è stato possibile valutare l'incrocio più promettente.

Per il confronto sono state realizzate delle tabelle riassuntive dei miglioramenti ottenuti in ogni scenario, per paragonare i valori in percentuale e non quelli assoluti.

Vengono riportati degli esempi:

MIGLIORAMENTI (500 auto/h, L = 150 m)								
	5% CV	10% CV	15% CV	20% CV	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	12%	14%	16%	37%	53%	71%	83%	86%
PERDITEMPO MEDIO [s]	5%	11%	18%	25%	31%	44%	55%	60%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	6%	12%	14%	20%	26%	37%	50%	52%
EMISSIONI CO [g/km]	3%	6%	12%	18%	21%	33%	47%	50%

Tabella 6: riassunto dei miglioramenti di 500 auto/h, L = 150 m

MIGLIORAMENTI (600 auto/h, L = 200 m)								
	5% CV	10% CV	15% CV	20% CV	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	12%	22%	29%	37%	44%	60%	74%	83%
PERDITEMPO MEDIO [s]	7%	13%	19%	25%	37%	40%	49%	53%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	7%	10%	16%	23%	27%	33%	41%	44%
EMISSIONI CO [g/km]	5%	8%	14%	22%	23%	29%	36%	40%

Tabella 7: riassunto dei miglioramenti di 600 auto/h, L = 200 m

MIGLIORAMENTI (700 auto/h, L = 250 m)								
	5% CV	10% CV	15% CV	20% CV	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	18%	24%	35%	47%	51%	64%	77%	80%
PERDITEMPO MEDIO [s]	15%	21%	28%	35%	40%	48%	61%	65%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	10%	13%	21%	28%	32%	37%	47%	52%
EMISSIONI CO [g/km]	8%	11%	17%	25%	26%	33%	42%	50%

Tabella 8: riassunto dei miglioramenti di 700 auto/h, L = 250 m

La soluzione migliore si è rivelata essere quella con 500 auto all'ora e una distanza di invio dell'informazione di 100 m. Sotto, nella tabella 6, vengono riportati i miglioramenti ottenuti in questo scenario.

MIGLIORAMENTI (500 auto/h, L = 100 m)								
	5% CV	10% CV	15% CV	20% CV	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	17%	23%	37%	42%	50%	76%	81%	91%
PERDITEMPO MEDIO [s]	12%	25%	36%	38%	47%	53%	64%	73%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	9%	17%	23%	30%	32%	47%	58%	65%
EMISSIONI CO [g/km]	16%	20%	28%	39%	40%	46%	59%	63%

Tabella 9: riassunto dei miglioramenti di 500 auto/h, L = 100 m

7.1.1 Confronto con scenari aggiunti

Una volta individuato lo scenario migliore, sono stati fatti ulteriori ragionamento sui parametri che inizialmente erano stati tenuti fissi, tra cui il ciclo semaforico e la velocità minima.

È stata realizzata un'intersezione con un ciclo semaforico da 90 secondi, composto da 38' di verde, 5' di giallo e 2' secondi di tutto rosso per le due direzioni principali, North-South e Est-West.

Sotto vengono riportati i dati ottenuti esaminando gli stessi intervalli di penetrazione dei veicoli connessi, esaminati per gli scenari ad una corsia.

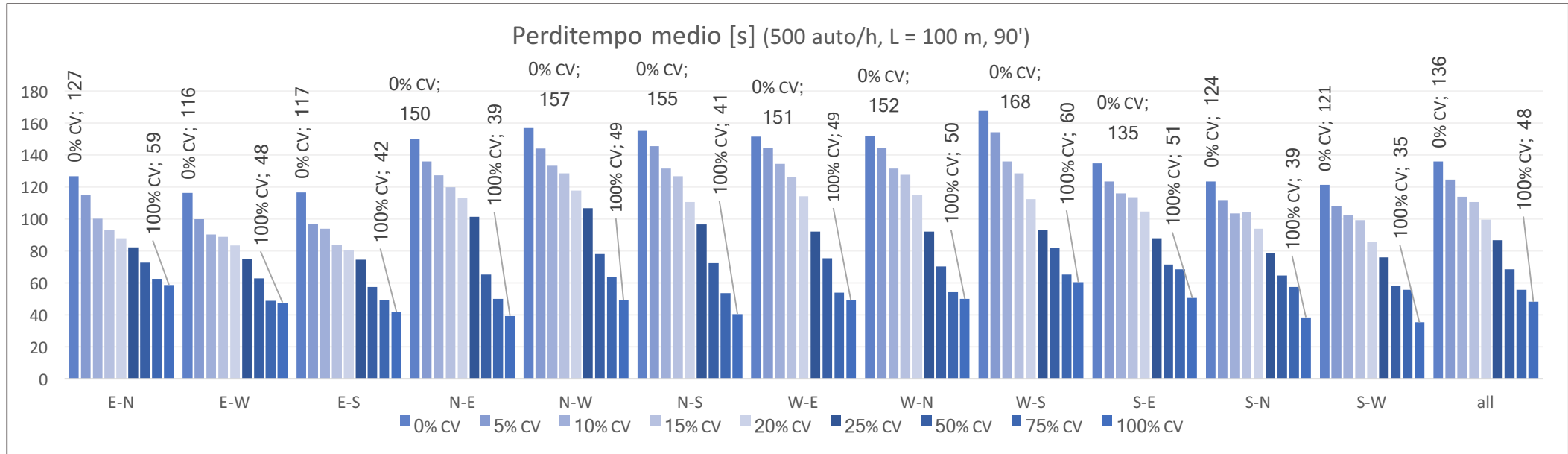


Grafico 9: valori di perditempo medio, 500 auto/h, L = 100 m, 90

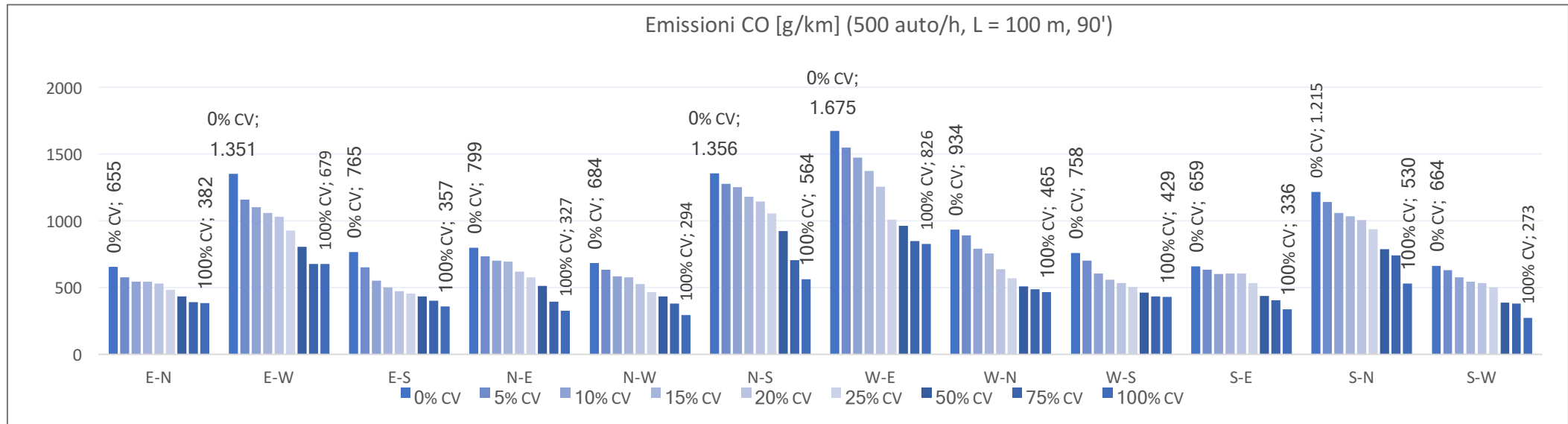


Grafico 10: valori di emissioni CO, 500 auto/h, L = 100 m, 90

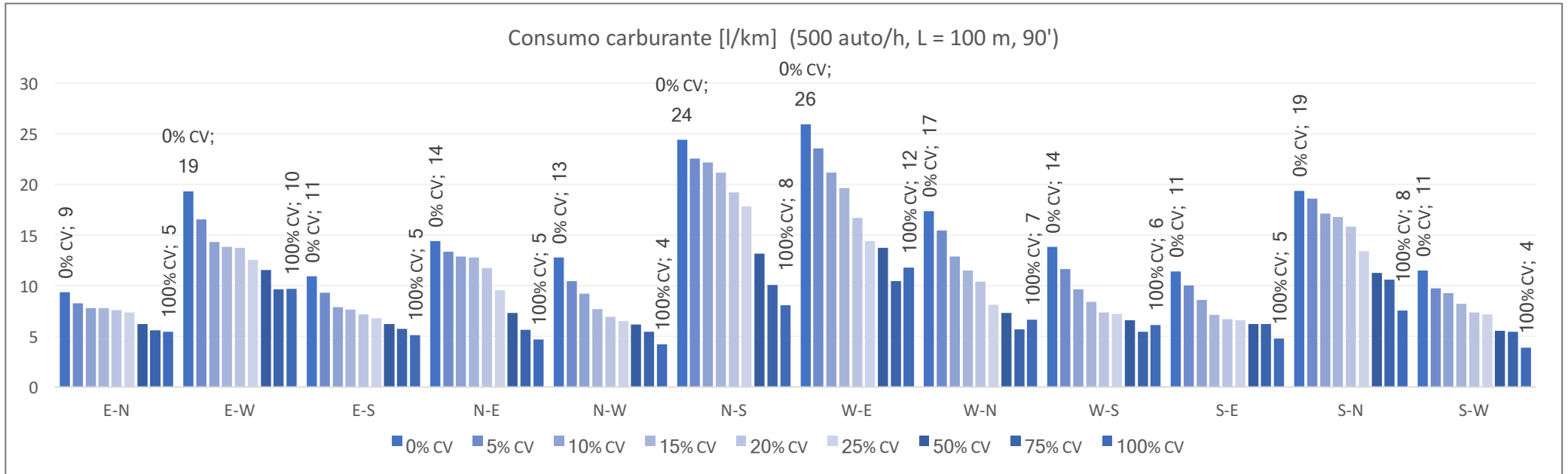


Grafico 11: valori di consumo carburante, 500 auto/h, L = 100 m, 90'

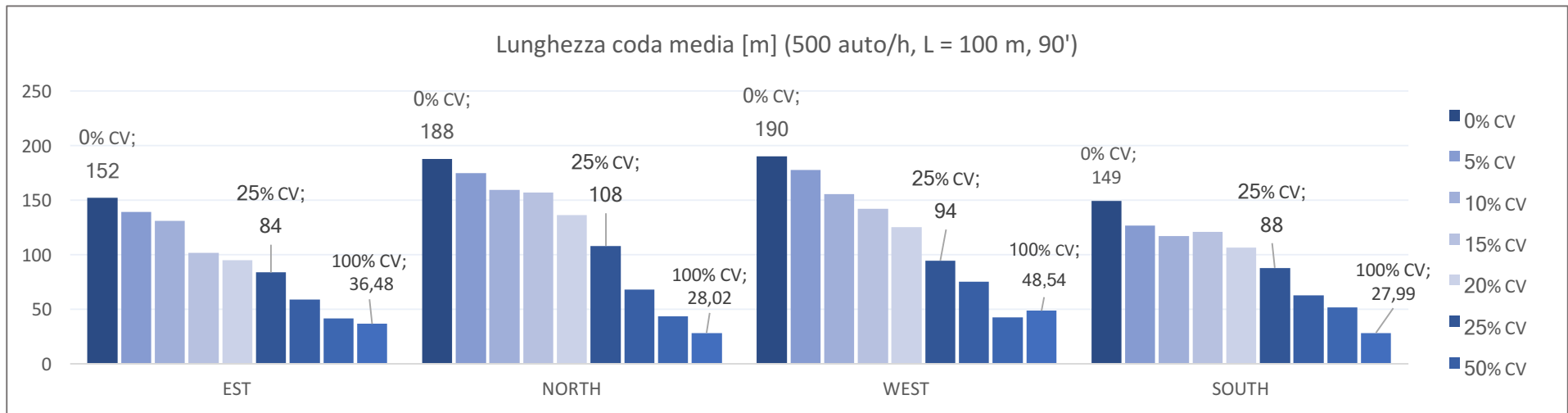


Grafico 12: valori di lunghezza di coda media, 500 auto/h, L = 100 m, 90'

MIGLIORAMENTI (500 auto/h, L = 100 m, 90')								
	5% CV	10% CV	15% CV	20% CV	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	7%	14%	24%	26%	45%	61%	73%	79%
PERDITEMPO MEDIO [s]	9%	16%	20%	27%	37%	50%	59%	66%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	11%	20%	25%	30%	37%	43%	51%	58%
EMISSIONI CO [g/km]	9%	14%	18%	26%	34%	39%	45%	52%

Tabella 10: riassunto dei miglioramenti di 500 auto/h, L = 100 m, 90'

Dalla tabella riassuntiva dei miglioramenti, si vede che in questa situazione con una corsia per senso di marcia, un ciclo semaforico di 90 secondi apporta meno benefici rispetto ad uno di 60 secondi. Il secondo confronto è stato fatto con uno scenario in cui la velocità comunicata dal sistema GLOSA viene diminuita del 10% per tenere conto del fatto che ci potrebbero essere dei veicoli fermi al semaforo, soprattutto in presenza di pochi veicoli elettrici. La velocità minima è rimasta a 15 km/h.

MIGLIORAMENTI (90% vel ottimale, vel min 15 km/h)								
	5% CV	10% CV	15% CV	20% CV	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	9%	13%	27%	40%	42%	71%	78%	82%
PERDITEMPO MEDIO [s]	7%	10%	18%	36%	30%	47%	56%	60%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	6%	10%	16%	27%	32%	46%	52%	57%
EMISSIONI CO [g/km]	6%	10%	15%	25%	31%	45%	50%	55%

Tabella 11: riassunto dei miglioramenti di 90% vel ottimale, vel min = 15 km/h

Visti i risultati è stato deciso di diminuire la velocità minima a 10 km/h, riporto i dati.

MIGLIORAMENTI (90% vel ottimale, vel min 10 km/h)								
	5% CV	10% CV	15% CV	20% CV	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	19%	24%	36%	39%	51%	62%	79%	83%
PERDITEMPO MEDIO [s]	15%	26%	35%	38%	44%	48%	57%	65%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	17%	23%	27%	33%	46%	51%	53%	59%
EMISSIONI CO [g/km]	18%	24%	28%	35%	47%	52%	53%	57%

Tabella 12: riassunto dei miglioramenti di 90% vel ottimale, vel min = 10 km/h

Riporto i dati relativi allo scenario iniziale per il confronto.

MIGLIORAMENTI (500 auto/h, L = 100 m)								
	5% CV	10% CV	15% CV	20% CV	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	17%	23%	37%	42%	50%	76%	81%	91%
PERDITEMPO MEDIO [s]	12%	25%	36%	38%	47%	53%	64%	73%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	9%	17%	23%	30%	32%	47%	58%	65%
EMISSIONI CO [g/km]	16%	20%	28%	39%	40%	46%	59%	63%

Tabella 13: riassunto miglioramenti scenario ottimale 1 corsia

La scelta di diminuire sia la velocità comunicata dal sistema sia quella minima era stata pensata per migliorare la situazione a bassi livelli di penetrazione, infatti in quella fascia si notano progressi leggermente superiori rispetto allo scenario iniziale mentre per alte percentuali di veicoli connessi, i miglioramenti sono inferiori.

I conducenti, però, in una guida manuale, non è detto che rispettino l'indicazione di una velocità così bassa, forse solo con la guida autonoma questo scenario sarà realizzabile.

In conclusione per quanto riguarda il caso di una singola corsia per senso di marcia, si può affermare che lo scenario migliore è quello con 500 auto l'ora con una distanza di 100 m per l'invio dell'informazione e, in caso di guida autonoma, si può pensare, per bassi livelli di penetrazione, di comunicare una velocità ottimale ridotta del 10%, con velocità minima di 10 km/h.

7.2 Risultati per intersezioni a due corsie

In questo settore i valori del flusso di traffico esaminati sono 600, 700 e 800 auto l'ora. Nei primi due casi, come ci si aspettava, i vantaggi nell'uso del sistema di comunicazione V2I sono ridotti a causa della possibilità di effettuare la manovra di sorpasso, mentre negli scenari con 800 auto l'ora, nell'intervallo 0%-25% CV, i vantaggi tornano ad avere un salto non indifferente.

Questo fenomeno è dovuto, probabilmente, al fatto che l'aumento del traffico porta ad avere un minor numero di sorpassi e quindi i vantaggi sono aumentati come succedeva con la singola corsia.

Viene riportato lo scenario con 700 auto all'ora e una distanza a cui viene comunicata la velocità di 200 m.

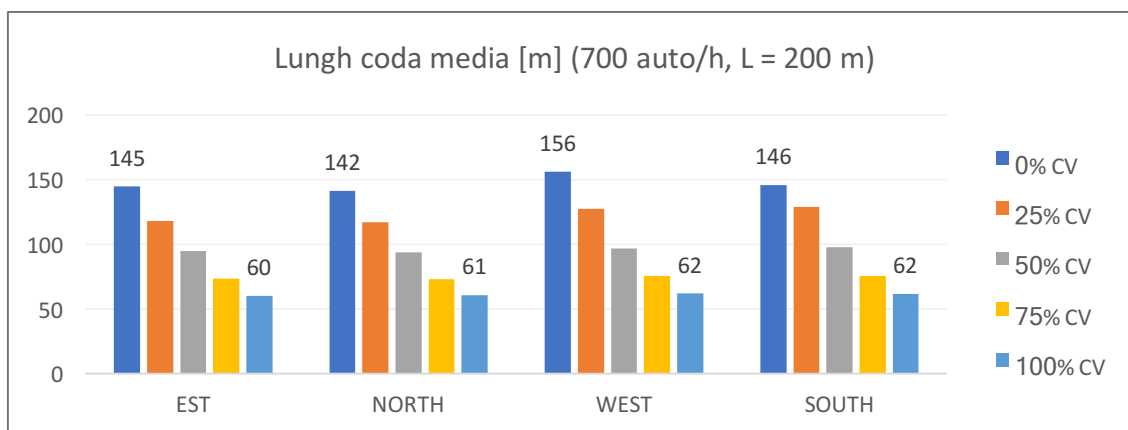


Grafico 13: valori di lunghezza della coda media 700 auto/h, L = 200 m

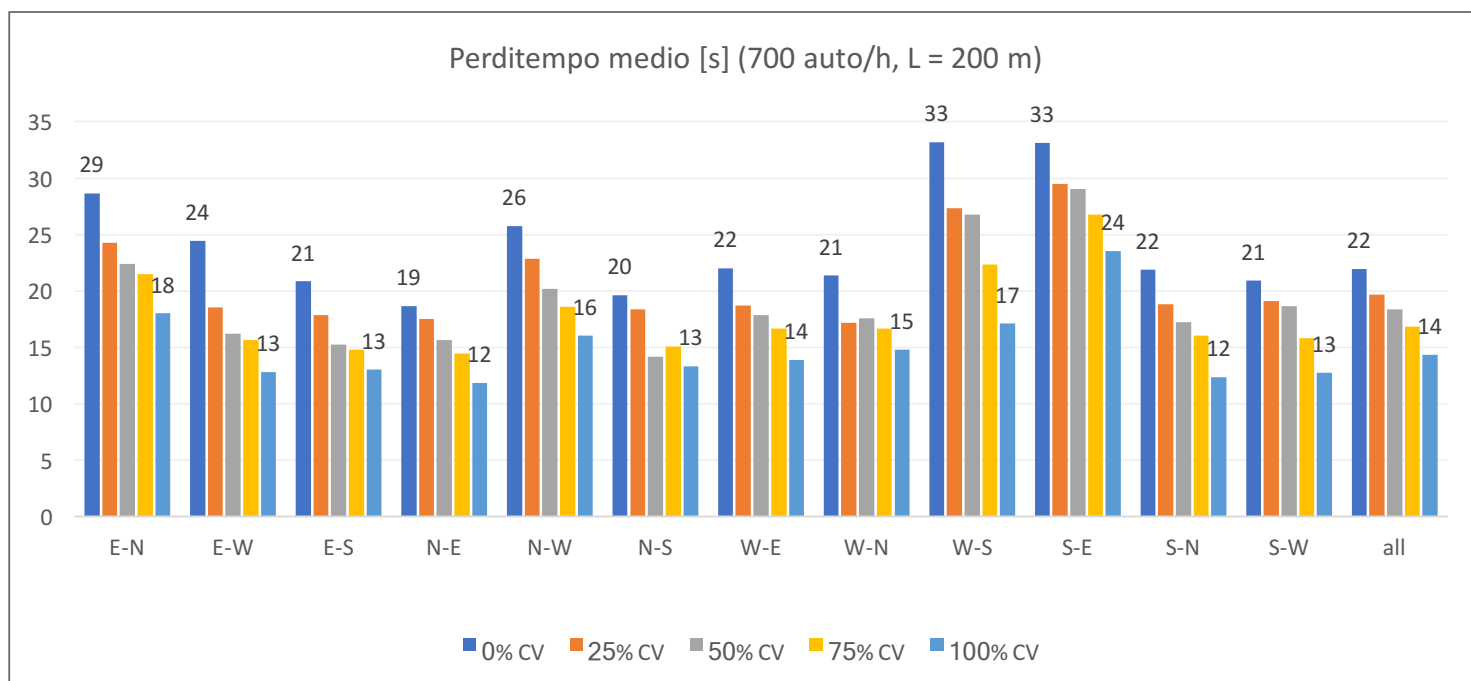


Grafico 14: valori di perditempo medio, 700 auto/h, L = 200 m

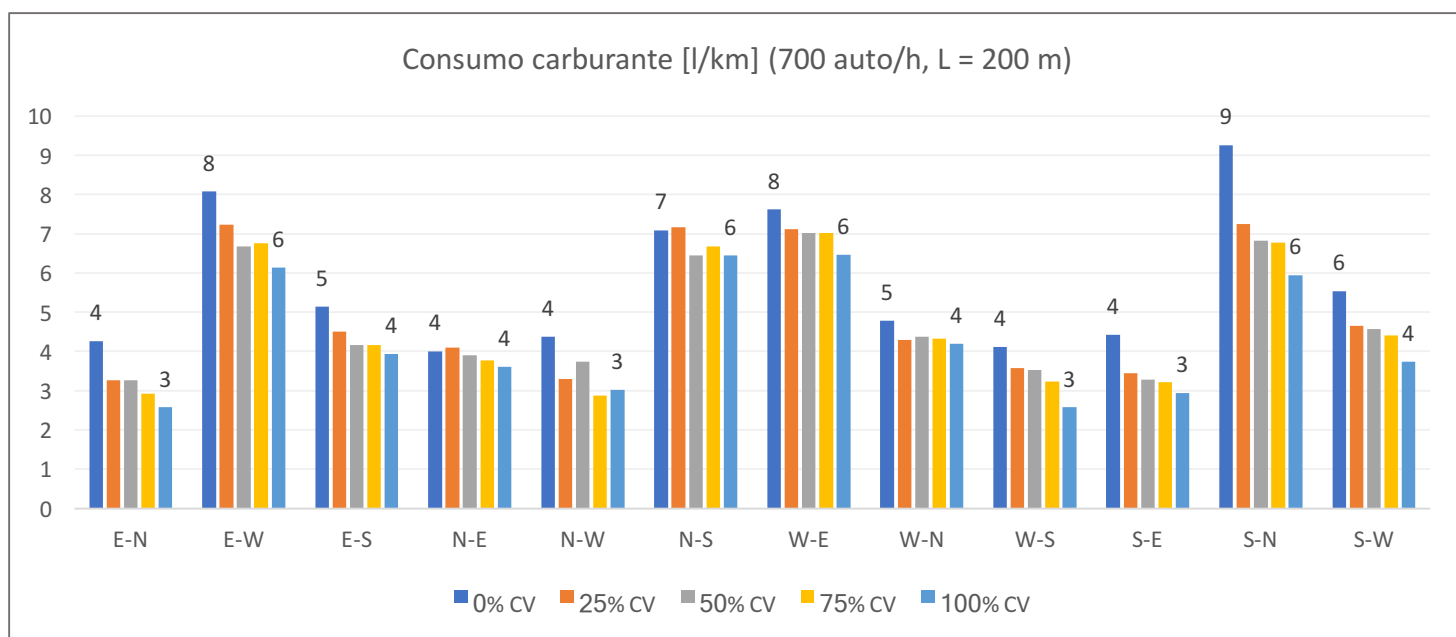


Grafico 15: valori di consumo carburante, 700 auto/h, L = 200 m

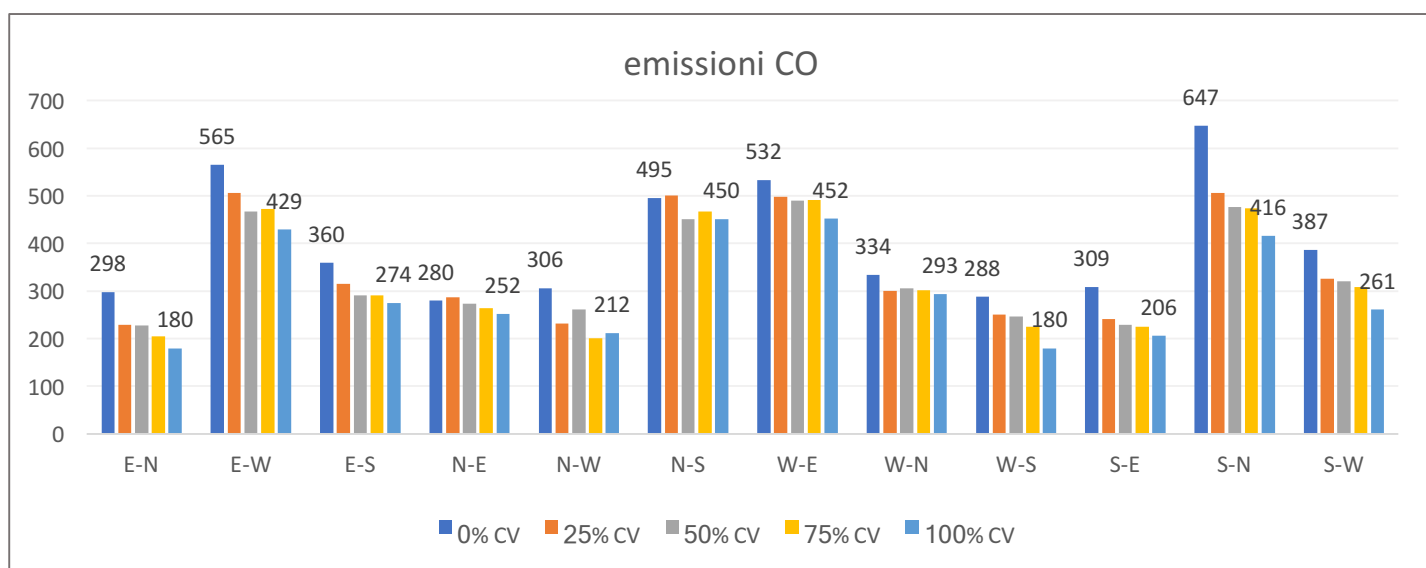


Grafico 16: valori di emissioni CO, 700 auto/h, L = 200 m

I miglioramenti in percentuale vengono riassunti nella tabella 14 sottostante.

MIGLIORAMENTI (700 auto/h, L = 200 m)				
	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	19%	31%	42%	48%
PERDITEMPO MEDIO [s]	14%	22%	28%	35%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	10%	16%	25%	31%
EMISSIONI CO [g/km]	9%	14%	23%	29%

Tabella 14: riassunto dei miglioramenti di 700 auto/h, L = 200 m

Per effettuare il confronto riporto solo le tabelle con i valori dei miglioramenti di alcuni degli altri scenari:

MIGLIORAMENTI (600 auto/h, L = 150 m)				
	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	13%	20%	26%	38%
PERDITEMPO MEDIO [s]	13%	16%	19%	25%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	13%	16%	19%	25%
EMISSIONI CO [g/km]	26%	36%	41%	44%

Tabella 15: riassunto dei miglioramenti di 600 auto/h, L = 150 m

MIGLIORAMENTI (600 auto/h, L = 200 m)				
	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	21%	30%	37%	48%
PERDITEMPO MEDIO [s]	9%	15%	20%	26%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	9%	15%	20%	26%
EMISSIONI CO [g/km]	41%	53%	62%	58%

Tabella 16: riassunto dei miglioramenti di 600 auto/h, L = 200 m

MIGLIORAMENTI (700 auto/h, L = 250 m)				
	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	21%	34%	48%	61%
PERDITEMPO MEDIO [s]	16%	29%	46%	55%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	15%	28%	35%	41%
EMISSIONI CO [g/km]	11%	25%	33%	39%

Tabella 17: riassunto dei miglioramenti di 700 auto/h, L = 250 m

Per studiare i risultati, è opportuno dividere in due gruppi gli scenari in cui vi sono due corsie, infatti c'è molta differenza tra gli scenari con 600 e 700 veicoli l'ora e quelli con 800 veicoli l'ora.

Nel primo caso vediamo che i miglioramenti sono più limitati a causa della possibilità di sorpasso e si osserva che, a differenza della corsia singola, le intersezioni che apportano più miglioramenti sono quelli in cui la distanza a cui viene comunicata l'informazione è maggiore. Tra i due flussi di traffico, invece, apporta più benefici lo scenario con 700 veicoli l'ora e una distanza di $L = 300$ m, riporto i valori.

MIGLIORAMENTI (700 auto/h, L = 300 m)				
	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	23%	37%	52%	66%
PERDITEMPO MEDIO [s]	22%	32%	49%	58%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	17%	30%	38%	44%
EMISSIONI CO [g/km]	15%	26%	37%	43%

Invece, come anticipato prima, per le intersezioni con 800 veicoli l'ora sono stati analizzati più valori di penetrazione dei veicoli CV come per le intersezioni con una corsia per senso di marcia.

Nella pagina seguente vengono mostrati i grafici, considerando una distanza a cui viene data l'informazione di 250 m.

Per una facile comprensione dei benefici apportati dal sistema, i risultati sono stati inseriti in un unico grafico evidenziando i valori di 0%, 25% e 100% di penetrazione delle auto connesse.

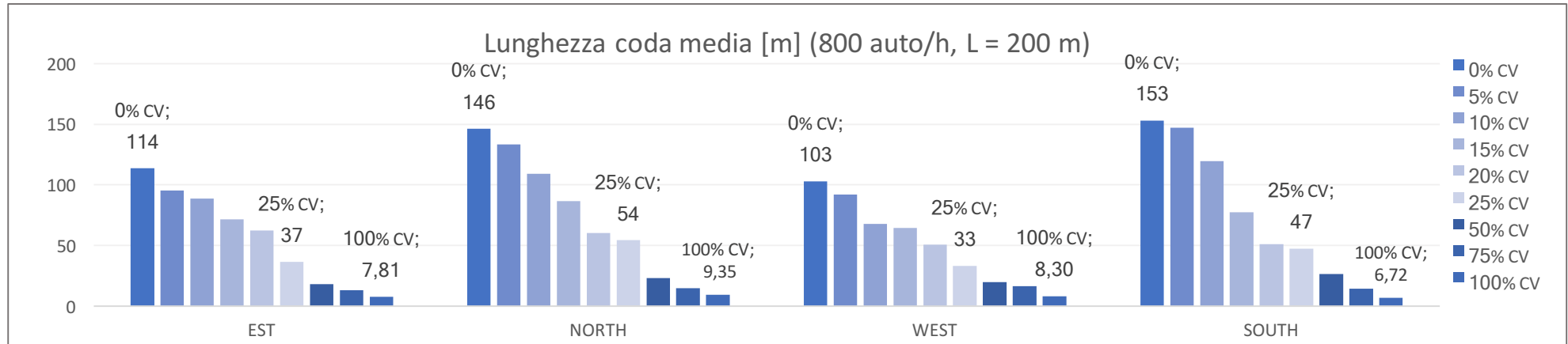


Grafico 17: valori di lunghezza della coda media, 800 auto/h, L = 250 m

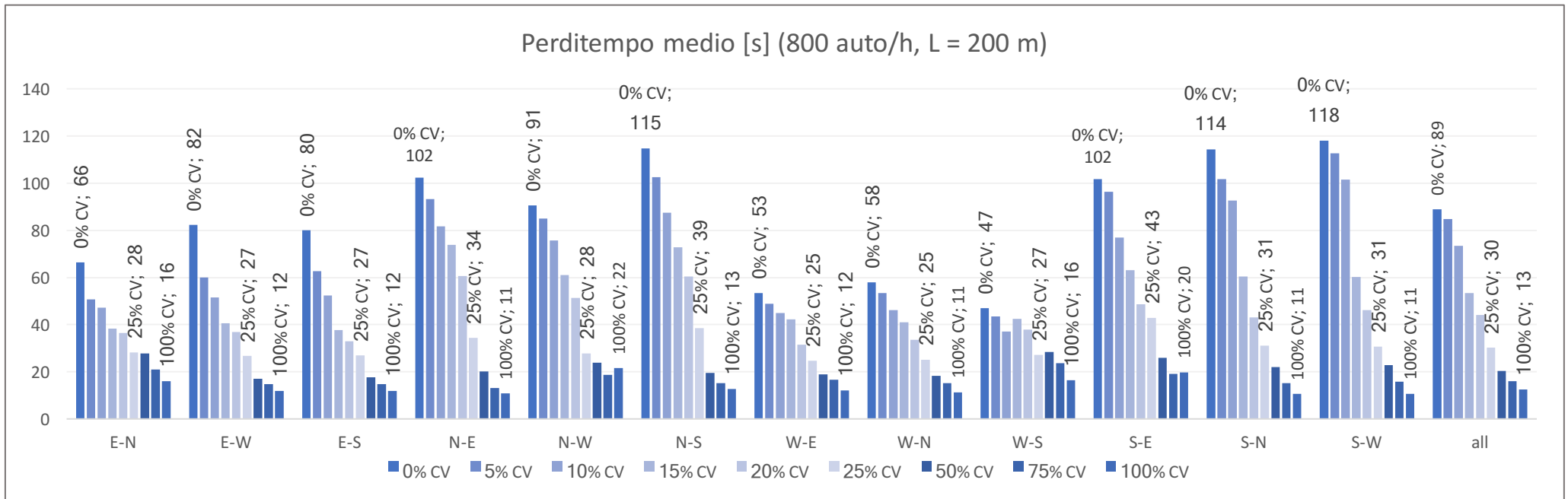


Grafico 18: valori di perditempo medio, 800 auto/h, L = 250 m

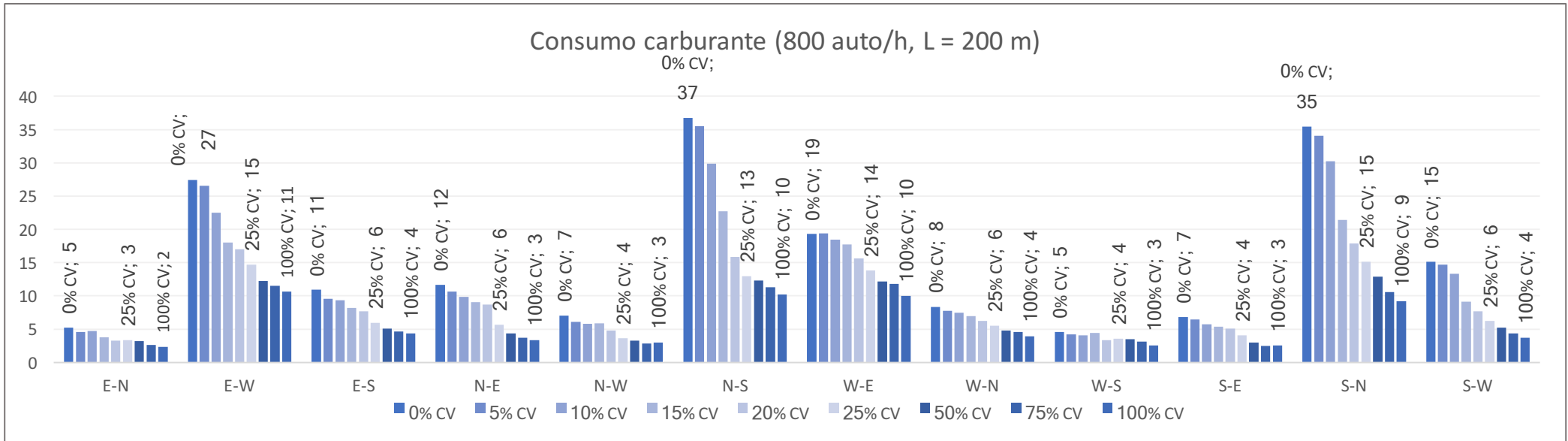


Grafico 19: valori di perdita tempo medio, 800 auto/h, L = 250 m

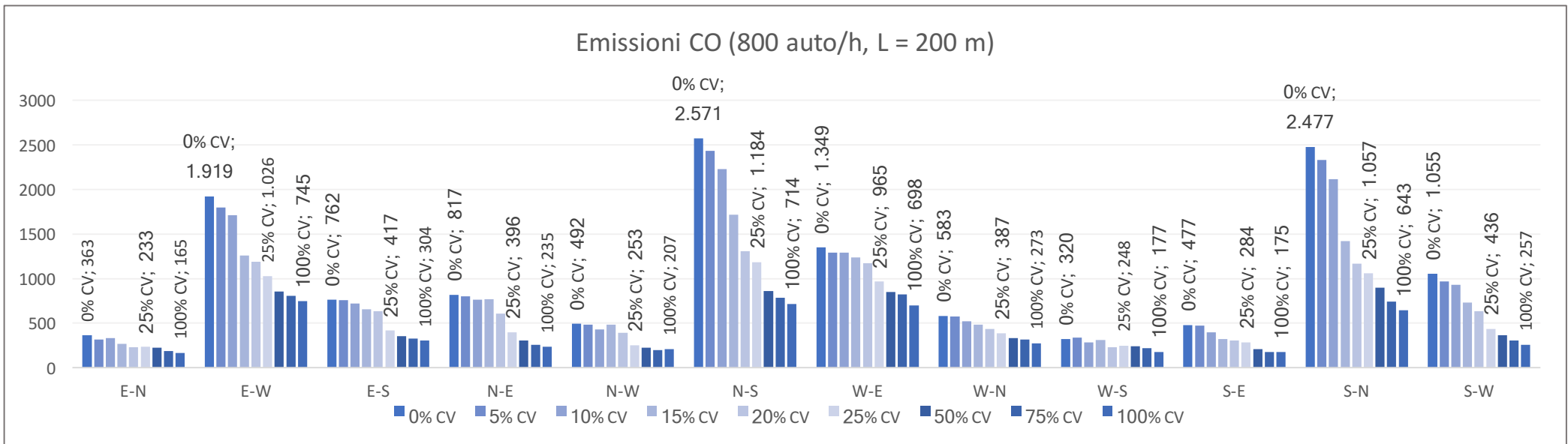


Grafico 20: valori di emissioni CO, 800 auto/h, L = 250 m

Riporta la tabella riassuntiva dei miglioramenti:

MIGLIORAMENTI (800 auto/h, L = 250 m)								
	5% CV	10% CV	15% CV	20% CV	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	10%	26%	41%	44%	67%	83%	88%	94%
PERDITEMPO MEDIO [s]	11%	23%	37%	48%	63%	72%	78%	82%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	6%	13%	24%	35%	45%	56%	60%	68%
EMISSIONI CO [g/km]	3%	11%	21%	32%	44%	52%	57%	62%

Questa procedura è stata eseguita per tutti gli scenari con 800 veicoli l’ora aumentando la distanza a cui viene data l’informazione. Per questo gruppo di intersezioni sono stati ottenuti i migliori risultati con la distanza minore a cui viene comunicata l’informazione, l’opposto rispetto al gruppo con flussi di 600 e 700 veicoli l’ora.

Quindi possiamo affermare che nel caso in cui si hanno due corsie, ovviamente con manovra di sorpasso permessa, a bassi flussi lo scenario migliore è con 700 veicoli l’ora e una distanza di 300 m, invece con alti flussi, il migliore è con 800 auto l’ora e una distanza di 250 m, che rappresenta anche il migliore assoluto, sia considerando due corsie che una.

7.2.1 Confronto con scenari aggiunti

Anche per il caso con due corsie sono stati aggiunti incroci di confronto per lo scenario con 600 veicoli l’ora e 150 m di distanza. Dato che la geometria comprendeva due corsie si è deciso di aumentare il limite di velocità della strada a 70 km/h.

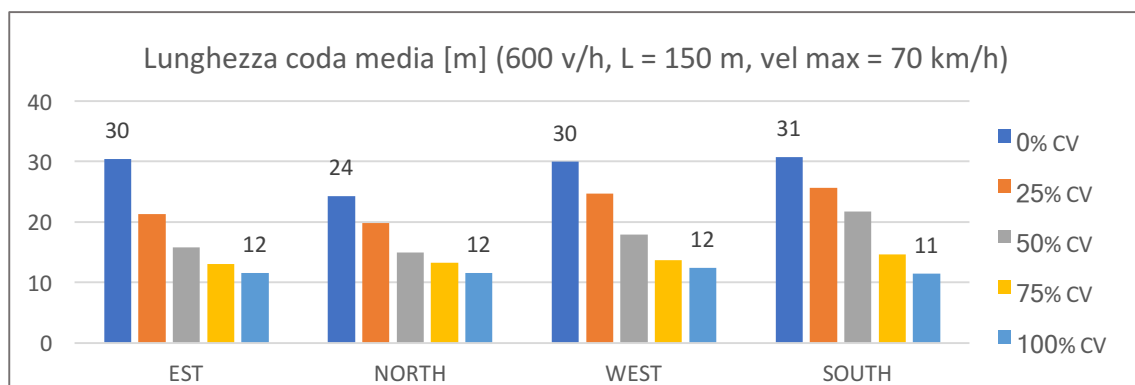


Grafico 21: valori di lung. coda media, 600 v/h, L = 150 m, v. max = 70 km/h

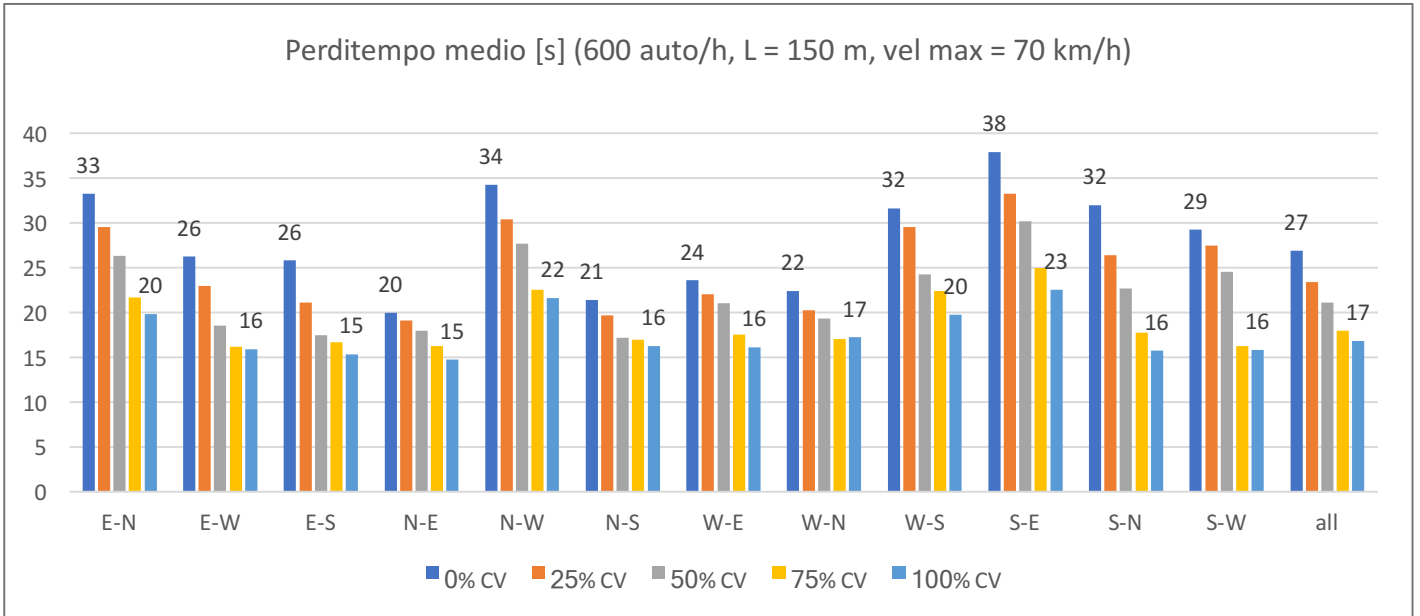


Grafico 22: valori di perditempo medio, 600 v/h, L = 150 m, v. max = 70 km/h

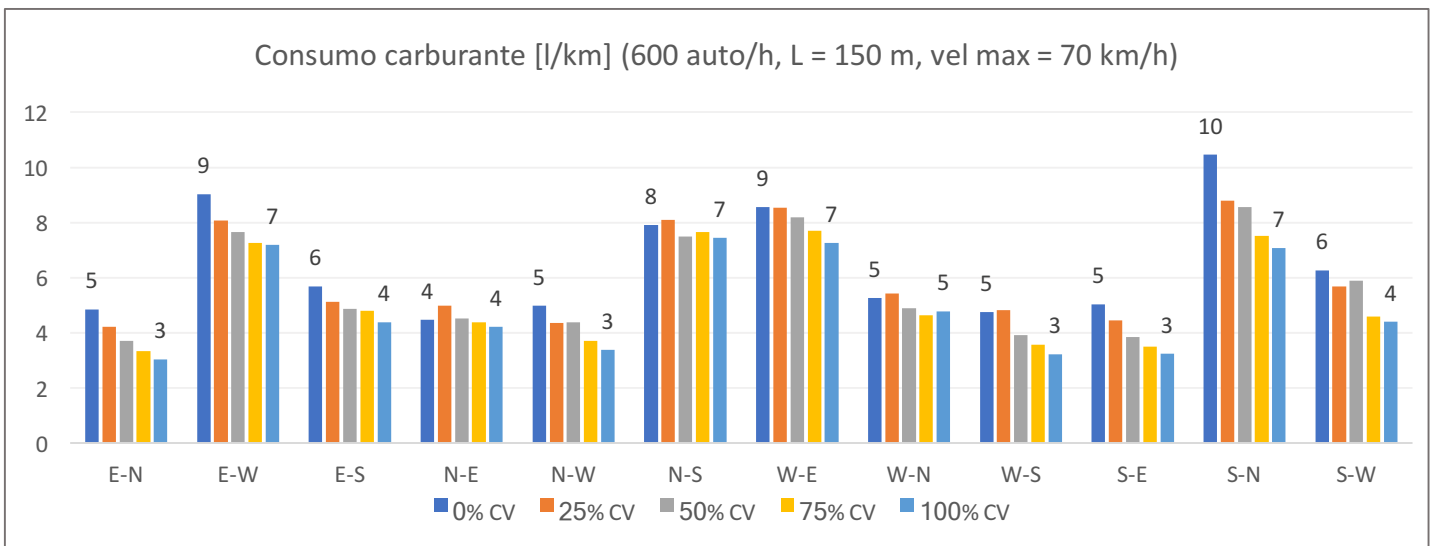


Grafico 23: valori di consumo carburante, 600 v/h, L = 150 m, v. max = 70 km/h

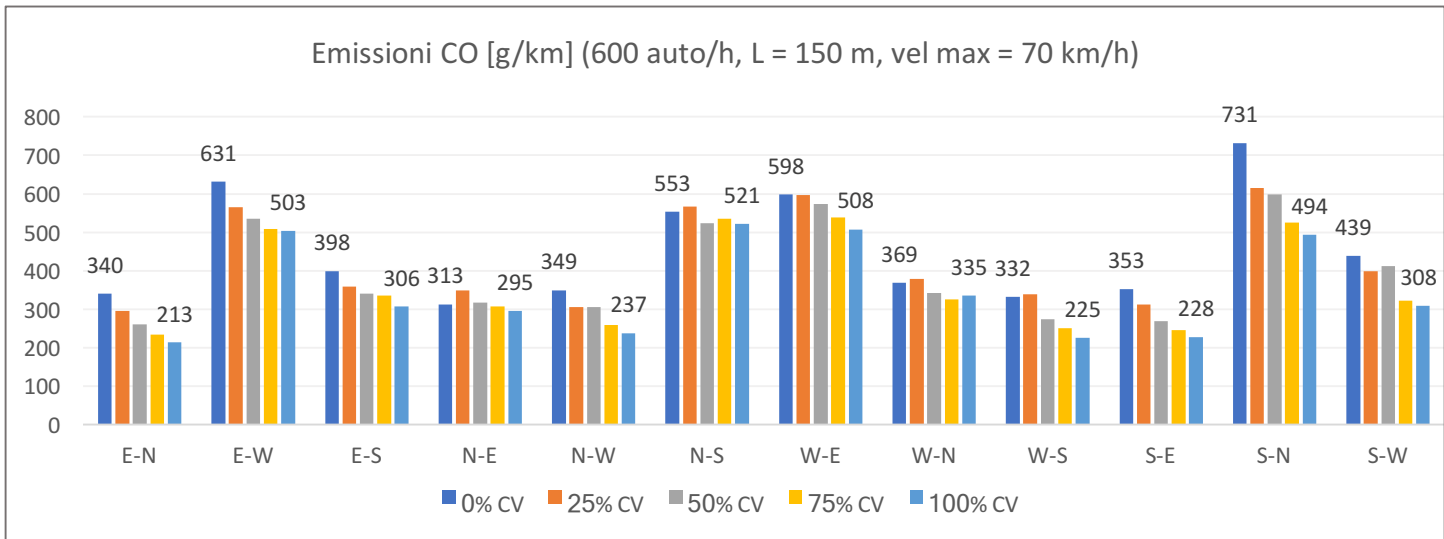


Grafico 24: valori di emissioni CO, 600 auto/h, L = 150 m, vel max = 70 km/h

Le percentuali di miglioramento vengono raggruppate nella tabella seguente.

MIGLIORAMENTI (600 auto/h, L = 150 m, vel max = 70km/h)				
	25% CV	50% CV	75% CV	100% CV
LUNGHEZZA CODA [m]	11%	20%	32%	36%
PERDITEMPO MEDIO [s]	5%	10%	18%	23%
CONSUMO CARBURANTE [l/km]	6%	12%	19%	25%
EMISSIONI CO [g/km]	20%	31%	39%	46%

Tabella 18: riassunto dei miglioramenti di 600 auto/h L = 150 m Vmax = 70km/h

I miglioramenti dati da questa situazioni sono minori rispetto alla soluzione con velocità massima di 50 km/h perché l'aumento della velocità massima della strada, soprattutto per le auto non connesse, porta ad un maggior numero di sorpassi che vanno a danneggiare i benefici della comunicazione V2I.

In definitiva la situazione migliore nel caso di due corsie è data da un'intersezione con velocità massima di 50 km/h, mentre come parametri 700 auto l'ora con una distanza di comunicazione della velocità di 300 m e 800 auto l'ora con $L = 200$.

CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo elaborato di tesi è quello di analizzare e valutare quali intersezioni possono trarre maggiori benefici dall' utilizzo del sistema Glosa, in grado di effettuare la comunicazione tra veicoli e infrastruttura V2I, più precisamente tra le auto connesse e i semafori intelligenti.

L'utilizzo di tale tecnologia determina numerosi vantaggi sia dal punto di vista degli automobilisti, con riduzioni di tempi di viaggio e di lunghezza delle code, sia dal punto di vista ambientale, con riduzione di emissioni di gas di scarico.

Sono stati creati numerosi scenari, sono stati mantenuti fissi alcuni parametri come il ciclo semaforico a 60 secondi e la composizione veicolare dei veicoli al di fuori delle auto, ovvero autobus, bici, scooter e moto. Invece sono stati variati altri dati come: la geometria, ossia incroci con una o due corsie per senso di marcia, i valori di flusso di traffico, la distanza a cui viene data l'informazione della velocità ottimale da mantenere e il grado di penetrazione delle auto connesse CV.

Il completamento di questa ricerca e catalogazione prevede che per ogni combinazione di parametri venga creata una categoria di intersezioni simulate che verranno associate per somiglianza a situazioni esistenti in una città con il fine di stabilire da quali intersezioni è meglio cominciare ad installare il sistema di comunicazione GLOSA.

La ricerca è stata suddivisa in due grossi settori, un primo caso con intersezioni con una corsia, e un secondo con due corsie. Inoltre, durante lo svolgimento di questo studio, combinando varie situazioni sono state riscontrate delle intersezioni in cui non fosse stato possibile utilizzare la tecnologia V2I, sia per problemi legati al superamento della capacità dell'incrocio in termine di flusso veicolare, sia per problemi legati all'incompatibilità del sistema stesso con la geometria.

I parametri usati per confrontare i miglioramenti ottenuti dai diversi scenari sono: la lunghezza della coda media, il perditempo medio calcolato come differenza tra tempo di viaggio reale e teorico, il consumo di carburante e l'emissione di monossido di carbonio CO.

In riferimento alle domande che hanno portato alla scelta dell'argomento di questo elaborato e che sono state poste inizialmente nell'introduzione, possiamo affermare che nel gruppo di intersezioni con una corsia per senso di marcia si ottengono ottimi risultati già a bassi tassi di penetrazione delle auto connesse, quindi non sussiste il problema della transizione. Questo accade perché con una singola corsia non è permesso il sorpasso quindi i veicoli comuni sono influenzati dall'andatura delle auto connesse che li precedono e quindi sono costretti a procedere secondo la velocità ottimale anche se questa non gli è stata comunicata dal sistema.

Quindi per questo primo gruppo lo scenario migliore è dato da un'intersezione con un ciclo semaforico da 60 secondi, con basso flusso veicolare e una limitata distanza a cui inviare l'informazione, ovvero con 500 auto l'ora e una distanza di 100 m. Questo scenario rimane quello che apporta maggiori benefici in percentuale anche se andiamo a variare i parametri che erano stati tenuti fissi, quindi con un ciclo semaforico di 90 secondi o con una velocità ottimale ridotta del 10% e le velocità minima ridotta a 10 km/h, si ottengono vantaggi più limitati.

Invece, per il caso con due corsie la situazione cambia, per bassi valori di flusso di traffico e per strade con velocità elevata, la manovra di sorpasso effettuata dai veicoli comuni avviene molto spesso e questo causa il degradato delle prestazioni del servizio di guida, quindi saranno necessari tassi di penetrazione più elevati per ottenere gli stessi benefici dell'intersezione con una corsia. In contrasto con le intersezioni a una corsia, in questo caso lo scenario migliore risulta essere quello con sia il flusso di traffico che la distanza, elevati, quindi con 700 auto l'ora e 300 m di lontananza.

In opposizione, in scenari con un flusso di traffico molto elevato, ovvero circa di 800 auto l'ora, la manovra di cambio corsia è meno presente, dato che i veicoli sono più ravvicinati e quindi c'è meno spazio per eseguire il sorpasso. Tra gli scenari analizzati

con questa quantità di auto circolanti, il migliore è risultato essere quello con una distanza di invio dell'informazione pari a 200 m.

La ricerca su questo campo, fino ad ora, si è concentrata nel trovare l'algoritmo e il sistema migliore per ottenere i migliori benefici e la migliore rappresentazione della realtà, focalizzandosi su un incrocio preciso o un corridoio stradale. L'innovazione principale di questa simulazione risiede nella possibilità di analizzare innumerevoli situazioni di incrocio con il fine di capire come procedere per l'installazione di questa tecnologia, una volta che verrà trovato il sistema migliore per applicarla.

In conclusione si può affermare che l'obiettivo della tesi è stato raggiunto e l'esito della campagna sperimentale è stato positivo e soddisfacente.

8.1 Lavori futuri

In questo capitolo vengono proposti dei suggerimenti per approfondire e continuare la ricerca in questo ambito.

In questo elaborato sono stati analizzati numerosi scenari con geometrie abbastanza semplici, come idea di ampliamento si potrebbero aggiungere situazioni più complesse come per esempio l'incrocio tra strade con numeri di corsie diverse o con corsie preferenziale oppure dedicate solo al tram e con flussi veicoli ancora più vari, il più somigliante possibile con la realtà.

La tecnologia data dal sistema GLOSA in questa simulazione è una comunicazione di tipo unilaterale, in altri termini, l'invio di informazioni avviene solo dal semaforo intelligente ai veicoli connessi e non viceversa. Quindi si potrebbe estendere la tecnologia in questo ramo, permettendo l'invio di indicazioni anche da parte del veicolo verso l'infrastruttura, per comunicare dati come la propria posizione o le scelte di percorsi future. Con questi dati si potrebbe anche prevedere un software nel sistema di bordo in grado di modificare tramite un algoritmo, le fasi del ciclo semaforico in base ai flussi di traffico convergenti verso l'intersezione da tutte le vie limitrofe, in modo da prediligere la direzione con flusso di traffico maggiore facendo fluire meglio lo scambio.

Le auto connesse CV, considerate in questa simulazione, sono a guida manuale, quindi tutte le azioni sono dettate dalle scelte degli automobilisti. Alcuni limiti di questa applicazione sono dati proprio dalle scelte dei conducenti nella condizione vincolante di guida manuale, molti di questi limiti potrebbero essere superati con l'utilizzo di auto a guida autonoma, con la quale si potrebbero ottenere ancora più vantaggi.

Vari sondaggi hanno mostrato che gli automobilisti non sono ancora improntati verso l'uso di questa nuova tecnologia, però questo sistema si può considerare come una base per rendere più facile il passaggio sia in termini di confort degli utenti sia in relazione al problema dato dalla transizione. Infatti minore sarà la diversità tra i veicoli tecnologici immessi nella rete e quelli già esistenti minore sarà l'impatto dato ai conducenti dei veicoli portandoli più volentieri ad usarli, sarà necessario un passaggio il più graduale possibile.

Con questo si concludono gli spunti inerenti all'argomento trattato, questo sistema analizzato credo sia uno dei più vicini alla nostra realtà e quindi spero che potrà essere uno dei prossimi che verrà applicato, portando molti benefici e gettando le basi di un lungo progresso del campo della tecnologia.

BIBLIOGRAFIA

Roberta Di Pace, Chiara Fiori, Luigi Pariota and Facundo Storani: “*Centralised Traffic Control and Green Light Optimal Speed Advisory Procedure in Mixed Traffic Flow: An Integrated Modelling Framework*”(2019).

Slobodan Gutesa, Joyoung Lee, Dejan Besenski: “*Development and Evaluation of Cooperative Intersection Management Algorithm under Connected and Automated Vehicles Environment*” (2020).

Slobodan Gutesa, Joyoung Lee, Dejan Besenski: “*Evaluating Suitable Glosa-Algorithms by Simulation Considering Realistic Traffic Conditions and V2X-Communication*” (2018)

J Pu, C Yin: “*Optimal control of fuel economy in parallel hybrid electric vehicles*” (2017).

Loose J., Scruffy P.: “*How to drill holes in water. In Figtree E. and Lemort D., eds., Coping with almost unsolvable problems, South Belgium Press, Bruxelles, B, 315–460*” (2018).

Onestone A.: “*A computer simulation of human ignorance. Human Stupidity Journal*” (2015).

Field F., Vole V.: “*A comparative analysis of food patches. Technical Report*”, The Brae Institute for Food Research, University of Insh, Insh, UK. (2016)

Klöppel-Gersdorf, Michael; Grimm, Jan.: “*Transport and Telecommunication*” (2020):

Bharadwaj Sathiamoorthy, Anup Bandivadekar, and Ben Sharpe: *“Testing the pollutant emissions and fuel efficiency of a commercial bus in India”* (2019)

Denise de Oliveira, Ana L.C. Bazzan, Victor Lesser: *“Using cooperative mediation to coordinate traffic lights: a case study”* (2017).

Le Yi Wang; Ali Syed; George Yin; Abhilash Pandya; Hongwei Zhang: *“Coordinated vehicle platoon control: Weighted and constrained consensus and communication network topologies”* (2020)

BidouraKhondaker¹LinaKattan: *“Variable speed limit: A microscopic analysis in a connected vehicle environment”* (2019).

ShuLin^{abc}BartDe Schutter^aYugengXi^{bc}HansHellendoorn^a: *“Efficient network-wide model-based predictive control for urban traffic networks”* (2020)

O. Servin; K. Boriboonsomsin; M. Barth: *“An energy and emissions impact evaluation of intelligent speed adaptation”* (2017)

Robert Braun ,Liselott Ericson ,Petter Krus: *“Full Vehicle Simulation of Forwarder With Semi-Active Suspension Using Co-Simulation”* (2021)

Mirchandani, P., Head: *“Connected Vehicle Pilot Deployment Program, Intelligent Transportation Systems Connected Vehicle Pilot Deployment Program”* (2020).

Ostojic, M., Stevanovic, A., Jolovic, D., Mahmassani: *“Assessment of the Robustness of Signal Timing Plans in an Arterial Corridor through Seasonal Variation of Traffic Flows”* (2017).

Wu, G., Zhao, Z., Wang, Z., Barth, M. J.: *“Development of Eco-Friendly Ramp Control for Connected and Automated Electric Vehicles. Institute of Transportation Studies”* (2020).

Rajab, S., Bai, X., Tian, D., Wu, G., Boriboonsomsin, K., Barth, M. J.: “*Systems and Methods for Cooperative Smart Lane Selection*” (2020).

Katsaros, K., Kernchen, R., Dianati, M., Rieck, D.: “*Performance Study of a Green Light Optimized Speed Advisory (GLOSA) Application Using an Integrated Cooperative ITS Simulation Platform. Proc*” (2011).

SITOGRAFIA

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5982524>

<https://core.ac.uk/download/pdf/31157449.pdf>

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6083084>

[file:///Users/Elisa-pc/Downloads/S04S01P04%20\(1\).PDF](file:///Users/Elisa-pc/Downloads/S04S01P04%20(1).PDF)

<file:///Users/Elisa-pc/Downloads/S04S01P04.PDF>

https://www.researchgate.net/publication/275855428_Green_Light_Optimized_Speed_Advisory_Systems

<https://conferences.computer.org/ispapub/pdfs/ISPA-BDCloud-SocialCom-SustainCom2020-61uthIiswrO37XTC10drpO/319900b470/319900b470.pdf>

<https://trid.trb.org/view/1759547>

<https://www.its.dot.gov/pilots/>

<http://www.itsknowledgeresources.its.dot.gov/ITS/benecost.nsf/0/73DE374084895A2985257EF10065B157?OpenDocument>

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: stilizzazione del sistema di comunicazione V2I.....	12
Figura 2: andamento delle emissioni suddiviso per continenti negli anni	14
Figura 3: calcolo della velocità da comunicare in base alla distanza dal semaforo...	21
Figura 4: componenti dei sottosistemi	23
Figura 5: scenari di approccio all'incrocio	24
Figura 6: software VISSIM.....	27
Figura 7: esempio di scrittura in Python.....	31
Figura 8: comunicazione della velocità, veicolo Audi.....	36
Figura 9: comunicazione del time to green, veicolo Audi	37
Figura 10: matrice simbolica per rappresentare tutti i possibili nodi di intersezione	41
Figura 11: schema delle intersezioni ammesse nella rete stradale.....	42
Figura 12: schema del ciclo semaforico da 60'	47
Figura 13: schema del ciclo semaforico da 90'.....	48
Figura 14: software VISSIM, intersezione a una corsia	53
Figura 15: software VISSIM: effetto di un'auto connessa sui veicoli comuni	54
Figura 16: software VISSIM, intersezione a due corsie	55
Figura 17: software VISSIM: geometria non idonea, vista 2D	57
Figura 18: software VISSIM: geometria non idonea, vista 3D	58
Figura 19: dati ottenuti dal software Vissim.....	61

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: schema degli scenari studiati	52
Tabella 2: dati della simulazione relativi alla Sezione di rilievo	62
Tabella 3: dati della simulazione relativi al Nodo	62
Tabella 4: dati della simulazione relativi ai Contatori di coda	63
Tabella 5: riassunto dei miglioramenti di 600 auto/h, L = 150 m	67
Tabella 6: riassunto dei miglioramenti di 500 auto/h, L = 150 m	68
Tabella 7: riassunto dei miglioramenti di 600 auto/h, L = 200 m	68
Tabella 8: riassunto dei miglioramenti di 700 auto/h, L = 250 m	68
Tabella 9: riassunto dei miglioramenti di 500 auto/h, L = 100 m	69
Tabella 10: riassunto dei miglioramenti di 500 auto/h, L = 100 m, 90'	72
Tabella 11: riassunto dei miglioramenti di 90% vel ottimale, vel min = 15 km/h	72
Tabella 12: riassunto dei miglioramenti di 90% vel ottimale, vel min = 10 km/h	72
Tabella 13: riassunto miglioramenti scenario ottimale 1 corsia	73
Tabella 14: riassunto dei miglioramenti di 700 auto/h, L = 200 m	76
Tabella 15: riassunto dei miglioramenti di 600 auto/h, L = 150 m	76
Tabella 16: riassunto dei miglioramenti di 600 auto/h, L = 200 m	76
Tabella 17: riassunto dei miglioramenti di 700 auto/h, L = 250 m	76
Tabella 19: riassunto dei miglioramenti di 600 auto/h L = 150 m Vmax = 70km/h .	82

INDICE DEI GRAFICI

Grafico 1: esempio di grafico della lunghezza della coda	63
Grafico 2: valori di perditempo medio, 600 auto/h, L = 150 m.....	64
Grafico 3: valori di lunghezza della coda media, 600 auto/h, L = 150 m.....	65
Grafico 4: valori di emissioni CO 600 auto/h, L = 150 m	65
Grafico 5: valori di perditempo medio, 600 auto/h, L = 150 m.....	66
Grafico 6: valori di consumo carburante, 600 auto/h, L = 150 m.....	66
Grafico 8: valori di lunghezza di coda media, 600 auto/h, L = 150 m	67
Grafico 7: valori di emissioni CO, 600 auto/h, L = 150 m	67
Grafico 11: valori di perditempo medio, 500 auto/h, L = 100 m, 90.....	70
Grafico 12: valori di emissioni CO, 500 auto/h, L = 100 m, 90	70
Grafico 13: valori di consumo carburante, 500 auto/h, L = 100 m, 90'.....	71
Grafico 14: valori di lunghezza di coda media, 500 auto/h, L = 100 m, 90'.....	71
Grafico 15: valori di lunghezza della coda media 700 auto/h, L = 200 m.....	74
Grafico 16: valori di perditempo medio, 700 auto/h, L = 200 m.....	74
Grafico 17: valori di consumo carburante, 700 auto/h, L = 200 m.....	75
Grafico 18: valori di emissioni CO, 700 auto/h, L = 200 m	75
Grafico 19: valori di lunghezza della coda media, 800 auto/h, L = 250 m.....	78
Grafico 20: valori di perditempo medio, 800 auto/h, L = 250 m.....	78
Grafico 21: valori di perditempo medio, 800 auto/h, L = 250 m.....	79
Grafico 22: valori di emissioni CO, 800 auto/h, L = 250 m	79
Grafico 23: valori di lungh. coda media, 600 v/h, L = 150 m, v. max = 70 km/h	80

Grafico 24: valori di perditempo medio, 600 v/h, L = 150 m, v. max = 70 km/h 81

Grafico 25: valori di consumo carburante, 600 v/h, L = 150 m, v. max = 70 km/h.. 81

Grafico 26: valori di emissioni CO, 600 auto/h, L = 150 m, vel max = 70 km/h..... 82

