

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e territoriale

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile

Orientamento: Infrastrutture di trasporto



Truck Platooning nell'ambito dei C-ITS

Nuovi scenari sulla mobilità ed impatti sulla logistica

Relatore: Luca Studer

Tesi di Laurea di:

Serio Angelo Maria Agriesti

863068

Anno accademico: 2016-2017

Sommario

1. Introduzione	1
2. Truck Platooning.....	6
2.1 Funzionamento e sviluppo della tecnologia	6
2.2 Benefici del truck platooning	11
2.3 Barriere e tematiche ancora aperte	15
2.4 Carburante, consumi ed emissioni.....	22
2.4.1 Fuel-Efficient Centralized Coordination of Truck Platooning (2016) – Sebastian Van De Hoef.....	24
2.4.2 Fuel-Saving Potential of Platooning Evaluated through Sparse Heavy-Duty Vehicle Position Data (2014) – Liang K., Mårtensson J., Johansson K. H.....	29
2.4.3 A Distributed Framework for Coordinated Heavy-Duty Vehicle Platooning (2015) – Larson J., Liang K., Johansson K. H., Fellow, IEEE.....	35
2.4.4 Effect of Platooning on Fuel Consumption of Class 8 Vehicles Over a Range of Speeds, Following Distances and Mass (2014) - Lammert , M.P., Duran , A., Diez , J., Burton , K., Nicholson , A.	39
2.4.5 Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis (2016) – Deng Q.....	44
2.4.6 Networked control challenges in collaborative road freight transport (2016) – Liang K., van de Hoef S., Terelius H., Turri V., Besselink B., Mårtensson J., Johansson H. K.	47
2.4.7 Parametri assunti in altri lavori	53
2.5 Infrastruttura e truck platooning.....	59
2.5.1 Design and Control of Automated Truck Traffic at Motorway Ramps (2004) – Tabibi M.....	61
2.5.2 Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis (2016) – Deng Q.....	74
2.5.3 Cooperative Communication Networkfor Adaptive Truck Platooning (2017) – Gheorghiu R. A., Iordache V., Cormos A. C.....	77
2.6 Modellizzazione delle possibili manovre	80

2.6.1	The influence of Traffic on Heavy-Duty Vehicle Platoon Formation (2016) – Liang K., Deng Q., Mårtensson J., Ma X., Johansson K. H.	82
2.6.2	Evaluation of Driver Assistive Truck Platooning on Traffic Flow (2015) – Gordon M. M.....	86
2.6.3	A Multi-layer Control Approach to Truck Platooning: Platoon Cohesion subject to Dynamical Limitations (2017) – Zegers J.C., Semsar-Kazeroon E., Fusco M., Ploeg J.....	92
2.6.4	Modeling and understanding the implications of future truck technology scenarios for performance-based freight corridor planning (2016) -Smith D. A.	97
2.6.5	Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis (2016) – Deng Q.....	103
2.6.6	Truck platooning application (2017) – Ellwanger S., Wohlfarth E.	112
2.7	Interazione tra il platoon e gli altri veicoli	115
2.7.1	Study of communication needs in interaction between trucks and surrounding traffic in platooning (2017) – Andersson, Jonas, Englund, Cristofer, Voronov, Alexey	116
2.8	Definizione dello scenario attuale	119
3.	C-ITS Day 1 & Truck Platooning	130
3.1	C-ITS Day 1	130
3.2	Emergency electronic brake light (EEBL)	134
3.3	Emergency vehicle approaching	136
3.4	Road Works Warning	140
3.5	Probe Vehicle Data.....	142
3.6	GLOSA – Green Light Optimized Speed Advice	144
3.7	Traffic jam ahead warning & slow or stationary vehicle	148
3.8	Weather conditions.....	150
3.9	C-ITS Day 1.5 ed oltre & Truck Platooning	152
3.10	Conclusioni	154
	Bibliografia	160

Indice delle figure

Figura 1.1:List of C-ITS Day 1	4
Figura 2.1: Tecnologie di assistenza alla guida	8
Figura 2.2: Orizzonti temporali – TNO 2015 Truck Platooning driving the future of transportation .	9
Figura 2.3: Connessione e Platoon.....	10
Figura 2.4:Daimler Truck - www.daimler.com	11
Figura 2.5: Benefici derivanti dal truck platooning	14
Figura 2.6: Armonizzazione della legislazione	16
Figura 2.7: Barriere all'implementazione del truck platooning	21
Figura 2.8: Peloton-Aerodinamica platoon	23
Figura 2.9: Platoon Coordinator - Sebastian Van De Hoef.....	24
Figura 2.10:Esempio di "feature" binaria	26
Figura 2.11: Risultati catch up coordination	32
Figura 2.12:Risultati departure coordination	33
Figura 2.13:Risultati transport coordination scheme	33
Figura 2.14:Algoritmo del controller	36
Figura 2.15: Air drag in funzione dell'headway - Wolf-Heinrich ed Ahmed 1998	44
Figura 2.16: Minori consumi per gli altri veicoli.....	45
Figura 2.17: Networked control challenges in collaborative road freight transport	48
Figura 2.18: Networked control challenges in collaborative road freight transport	48
Figura 2.19: Risultato delle simulazioni	50
Figura 2.20:Decrease in fuel consumption - Spacing	56
Figura 2.21: Consumo di carburante - Velocità.....	57
Figura 2.22: Risparmi di carburante-schema riassuntivo.....	58
Figura 2.23: Approcci alle rampe	60
Figura 2.24: Dedicated freight lane - right.....	63
Figura 2.25: Buffer area - Design and control of Automated Truck Traffic at Motorway ramps	67
Figura 2.26: Mainline buffer - Design and control of Automated Truck Traffic at Motorway ramps	68
Figura 2.27:Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis (2016) – Deng Q.....	75
Figura 2.28: Manovra di sorpasso [85]	78
Figura 2.29: Sistema V2I (Vehicle to Infrastructure) [85].....	79

Figura 2.30: Modellizzazione-schema riassuntivo.....	82
Figura 2.31: The influence of Traffic on Heavy-Duty Vehicle Platoon Formation (2016).....	82
Figura 2.32: I-85 Auburn-Opelika	87
Figura 2.33: Valori assunti nella simulazione.....	94
Figura 2.34: Autonomous Truck Platoon.....	97
Figura 2.35: Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis (2016) - Deng Q.....	103
Figura 2.36: Fuel Efficiency of Passenger Car - Penetration Rate of HDV Platooning	108
Figura 2.37: Risultati Heavy-Duty vehicle platooning – modeling	109
Figura 2.38: Comunicazione platoon - traffico circostante.....	118
Figura 2.39: European Real Life Cases Truck Platooning, 2017-2019 – Rijkswaterstaat.....	123
Figura 2.40: Platoon - parametri caratteristici	124
Figura 2.41: Platoon - parametri caratteristici 2	125
Figura 3.1: Orizzonti temporali di riferimento.....	133
Figura 3.2: C-Roads Working Group 2, Task Force two Common C-ITS Service Definitions [79]	134
Figura 3.3: FCW ed EEBL a confronto - Vehicle Safety Communications - Applications [78].....	135
Figura 3.4: Flusso delle informazioni	137
Figura 3.5: Distanza necessaria al disfacimento del platoon	138
Figura 3.6: Use case olandese	140
Figura 3.7: TCC triggered.....	141
Figura 3.8: Flusso di dati per il Road Works Warning	142
Figura 3.9: Esempio Olandese – Rijkswaterstaat.....	144
Figura 3.10: Flusso di informazioni nel GLOSA.....	145
Figura 3.11: Pro e contro del GLOSA in concerto con il truck platooning	147
Figura 3.12: Slow vehicle warning use case scenario [76].....	149
Figura 3.13: V2I - ghiaccio su strada [79]	151
Figura 3.14: Co-operative merging assistance use case scenario [76].....	152
Figura 3.15: Electronic Toll Collect [76].....	154

Indice delle tabelle

Tabella 2-1:Fuel-Efficient Centralized Coordination of Truck Platooning	29
Tabella 2-2:Fuel-Saving Potentials of Platooning evaluated through sparse heavy-duty vehicle position data	34
Tabella 2-3:Potenzialità del truck platooning sulla rete tedesca Autobahn	38
Tabella 2-4: A Distributed Framework for Coordinated Heavy-Duty Vehicle Platooning.....	39
Tabella 2-5: : Effect of Platooning on Fuel Consumption of Class 8 Vehicles Over a Range of Speeds, Following Distances and Mass	41
Tabella 2-6:Output convertiti secondo le unità di misura dell'SI.....	43
Tabella 2-7: Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis	46
Tabella 2-8: Networked control challenges in collaborative road freight transport (2016) – Liang K., van de Hoef S., Terelius H., Turri V., Besselink B., Mårtensson J., Johansson H. K.	53
Tabella 2-9:Design and Control of Automated Truck Traffic at Motorway ramps - Tabibi M.	74
Tabella 2-10: Heavy-Duty Vehicle Platooning - Modeling and Analysis - Deng Q.....	77
Tabella 2-11:The influence of Traffic on Heavy-Duty Vehicle Platoon Formation – Liang K., Deng Q., Mårtensson J., Ma X., Johansson K. H.	86
Tabella 2-12:Evaluation of Driver Assistive Truck Platooning on Traffic Flow (2015) – Gordon M. M.	92
Tabella 2-13:A Multi-layer Control Approach to Truck Platooning: Platoon Cohesion subject to Dynamical Limitations (2017) – Zegers J.C., Semsar-Kazeroon E., Fusco M., Ploeg J.....	97
Tabella 2-14: Modeling and understanding the implications of future truck technology scenarios for performance-based freight corridor planning	102
Tabella 2-15:Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis (2016) – Deng Q.....	111
Tabella 2-16:Truck platooning application (2017) – Ellwanger S., Wohlfarth E.....	115
Tabella 3-1: C-ITS Day 1 & Truck Platooning - Sintesi	157
Tabella 3-2: Necessità di comunicazione.....	159

Abstract

Il trasporto di merci su gomma è una realtà in espansione costretta a fare i conti con disponibilità sempre minori di spazi infrastrutturali e livelli sempre più alti di congestione. Per far fronte alle future necessità del settore è necessario ricorrere a soluzioni innovative in grado di ottimizzare l'utilizzo della rete stradale esistente e rendere più efficiente il deflusso di traffico. Tra queste una delle più promettenti è senz'altro quella del *truck platooning*, un sistema che grazie all'utilizzo del CACC e della connessione WI-FI ETSI ITS-G5 garantisce una minore occupazione dell'infrastruttura, un sistema di assorbimento delle shockwave ed un minor consumo di carburante. Prevedendo un certo livello di automazione, però, il truck platooning non è ancora stato supportato da una rilevante campagna di test su strade pubbliche e non se ne è ancora delineato un quadro comune e condiviso per quanto riguarda le grandezze in gioco ed i parametri caratteristici. Lo scopo della presente tesi è quindi quello di confrontare tutti gli approcci reperiti in bibliografia con particolare attenzione agli input considerati ed alle ipotesi effettuate, mettendo in evidenza i rapporti di causa ed effetto che possono portare all'adozione di un determinato valore per tutti i parametri principali. Nel secondo capitolo, quindi, non ci si limiterà alla caratterizzazione dello scenario attuale ma si effettuerà un'analisi critica di un sistema di trasporto che non è ancora realtà e per il quale è ancora improprio parlare di stato di fatto. Si metteranno a confronto le diverse tematiche che afferiscono a questa tecnologia cercando di armonizzarne, il più possibile, le necessità e di evidenziare in quali aspetti sia necessario un compromesso. Una volta delineati gli scenari di implementazione più probabili del truck platooning se ne approfondirà, nel terzo capitolo, l'interazione con i C-ITS Day 1 per l'impiego dei quali è previsto un orizzonte temporale analogo, evidenziando con quali di questi è possibile una simbiosi in grado di enfatizzare le rispettive potenzialità e i requisiti necessari perché tale enfaticizzazione sia sfruttata al massimo.

Ringraziamenti

Per prima cosa vorrei ringraziare il Professor Luca Studer per avermi offerto l'occasione di lavorare ad un argomento così interessante e stimolante come quello oggetto della tesi. Senza il suo continuo supporto e guida non sarebbe stato possibile portare a termine questo lavoro e non avrei mai scoperto quanto mi affascinasse il mondo dei C-ITS e della mobilità cooperativa. Grazie per avermi incoraggiato e per aver intravisto in un semplice Power Point la passione di uno studente che ancora non aveva capito quanto gli piacesse lavorare a questo tipo di argomenti. La mia gratitudine va anche a Marco Ponti, Fabio Borghetti, Paolo Gandini e Giovanna Marchionni che hanno chiarito molti dei miei dubbi e con i quali il continuo confronto mi ha permesso di identificare le direzioni degne di approfondimenti ed evitare tutti i potenziali vicoli ciechi. Grazie per aver ascoltato le mie considerazioni e per avermi fatto sentire sin da subito in grado di lavorare a qualcosa di importante.

Tutta la gratitudine e l'affetto di cui il mio cuore è capace vanno alla mia famiglia. Devo tutto ai miei genitori che hanno fatto miracoli per farmi studiare e non me lo hanno fatto pesare una singola volta, mi hanno aiutato a mantenere tutto nella giusta prospettiva e hanno permesso che io mi innamorassi della vita accademica e dello studio. Grazie per ogni sacrificio di cui non mi avete detto nulla ma che so avete dovuto fare. Posso inoltre dire con assoluta certezza che non sarei la persona che sono se non fosse per la mia sorellina, a cui assicuro che ascolto tutto quello che dice molto più attentamente di quanto do a vedere. Grazie per avere il cuore al posto giusto e sapere sempre ciò che è giusto e ciò che è sbagliato.

Se è stato così bello lavorare a questa tesi lo devo anche ai miei compagni di corso (e non, strutturisti non vi ho dimenticati). Grazie per aver sopportato tutti i miei sfoghi ed avermi tenuto compagnia quando le giornate sembravano interminabili, avete reso fantastici anche i più semplici pomeriggi di studio, aiutandomi a staccare la spina ogni volta che ne ho avuto bisogno. So che non sono la persona più semplice da avere attorno e che a volte richiedo pazienza, grazie per averla avuta.

1.Introduzione

“Si prevede, entro il 2030, una crescita significativa del trasporto merci europeo. Nonostante sia auspicabile che questa crescita sia assorbita dai modi ferroviario e marittimo, diventa sempre più chiaro che una porzione significativa del trasporto merci dovrà viaggiare su gomma. La rete ferroviaria è limitata per capacità in alcune nazioni e non offre un’affidabilità sufficiente riguardo i tempi di arrivo, inoltre l’ampliamento dell’infrastruttura può necessitare di un orizzonte temporale di 20 anni. In quest’ottica diventa chiaro quanto convenga esaminare le soluzioni volte a rendere il trasporto su gomma il più efficiente possibile.” (Conditions for efficient road transport in Europe – CEDR 2017)

Un incremento consistente del trasporto merci su gomma è una questione che coinvolge l’intero tessuto sociale poiché costituisce una fonte di problemi ambientali, legati alle emissioni, e sociali come la congestione dell’infrastruttura stradale ed il grado di incidentalità. Attualmente sono due milioni¹ i veicoli pesanti circolanti sulla rete stradale europea che conta circa 73000 Km².

Nello stesso orizzonte temporale prima citato si prevede, fortunatamente, il perfezionamento e l’ingresso nel mercato di diverse tecnologie legate alla mobilità. Praticamente tutte le parti coinvolte nel trasporto merci su gomma, con la possibile eccezione dei conducenti, concordano sull’opportunità costituita dalla progressiva automazione della guida e, se i veicoli a guida automatica sono ancora una realtà lontana, la guida cooperativa sembra essere già a portata di mano. La complessità di questa realtà, però, impone un’introduzione nel mercato controllata e coordinata, graduale piuttosto che improvvisa. In quest’ottica l’applicazione delle tecnologie C-ITS al trasporto merci su mezzi pesanti può costituire un primo, importante, gradino. La natura organizzata di questo tipo di realtà beneficia maggiormente dalla coordinazione del suo parco veicolare,

¹ ANFAC Vehicles in Use Report, National Association of Automobile and Truck Manufacturers, Madrid, Spain, 2011

² European Commission, EU Transport in Figures – Statistical Pocketbook, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2014

ancora di più perché perfettamente adatta alla formazione di *platoon*, cioè un plotone di veicoli viaggianti in formazione.

Il *truck platooning* è un sistema che permette, tramite l'utilizzo del CACC, Cooperative Adaptive Cruise Control, di diminuire di molto il distanziamento tra due camion bypassando i tempi di reazione ed il fattore umano. Questo è possibile grazie alle DSRC, dedicated short range communications, sistemi wireless in grado di trasmettere ai veicoli seguenti la velocità del veicolo precedente. Con questa informazione il Cruise Control regola la velocità di tutti i veicoli in modo ottimale, evitando frenate ed accelerazioni inutili e garantendo una marcia sicura con un distanziamento molto minore di quello garantito dalla guida tradizionale. In questo modo si ottengono due benefici sostanziali: si aumenta la **capacità dell'infrastruttura**, rendendo il flusso di veicoli più stabile ed accorciando le distanze, e si riducono di molto le **emissioni**. Quest'ultimo risultato viene ottenuto perché si impedisce ai vortici d'aria di formarsi tra un camion e l'altro, migliorando sensibilmente le prestazioni aerodinamiche dei veicoli e diminuendo le resistenze che si oppongono al moto. La progressiva automazione della guida, inoltre, garantisce una maggiore sicurezza intrinseca del sistema ed una maggiore qualità del lavoro per i conducenti. Quelli elencati sono i benefici strettamente legati all'utilizzo del CACC ed alla formazione del singolo platoon, le potenzialità maggiori però si esplicano tramite l'utilizzo di un service provider *super partes*, in grado di coordinare l'intero parco veicolare circolante sull'infrastruttura e permettere la formazione di un numero sempre più elevato di platoon, con una maggiore flessibilità.

I C-ITS, invece, sono quelle tecnologie in grado di mettere in comunicazione veicoli diversi tra loro e con l'infrastruttura, in questo modo non solo si può aumentare sostanzialmente la sicurezza di tutto il sistema ma si può ottimizzare il flusso veicolare in modo da diminuire la saturazione dell'infrastruttura e ritardare i fenomeni di congestione. Veicoli che si parlano tra loro e che, quindi, per un principio simile a quello del truck platooning, effettuano un numero minore di accelerazioni e decelerazioni, possono assorbire le shock wave e rendere più stabile il flusso di traffico. La comunicazione tra i vari veicoli e l'infrastruttura, inoltre, rende possibile implementare nel sistema funzioni come il re-routing e la regolazione ottimale delle intersezioni, la prioritizzazione dei veicoli d'emergenza e la segnalazione dei cantieri stradali. Le aspettative riposte nelle tecnologie digitali sono molte, come evidenziato nel documento "A European strategy on

Cooperative Intelligent Transport Systems, a milestone towards cooperative, connected and automated mobility”[3] che riporta: i servizi cooperativi C-ITS Day1 – se realizzati in modo interoperabile in Europa – produrranno un rapporto benefici costi del 3:1 cumulando benefici nel periodo 2018 -2030.

Risultano quindi chiare le potenzialità di questi sistemi, in grado di rendere più efficiente l’uso della rete stradale ed il trasporto pesante su gomma senza ampliare ulteriormente l’infrastruttura esistente e quindi investire ulteriore denaro ed occupare aree che possono essere impiegate per finalità socialmente più utili. Scopo della presente tesi è caratterizzarne il più approfonditamente possibile lo scenario che si sta delineando nelle realtà del truck platooning, esaminando la bibliografia disponibile al riguardo e confrontando le varie soluzioni proposte, in modo da fornire una base per i futuri lavori di ricerca ed un punto di riferimento per chi si appropria a queste tematiche per la prima volta. Si amplierà poi questo lavoro cercando di identificare tutte le direzioni verso cui si sta concentrando l’innovazione e di confrontarle evidenziando pregi e difetti dei vari approcci. Una volta sintetizzati gli studi ritenuti più importanti nei vari ambiti attinenti l’impiego di queste nuove tecnologie, si armonizzeranno il più possibile gli aspetti ancora non ben definiti, stabilendo quali parametri sono ormai consolidati e quali, invece, sono definiti da un range di valori variabile in funzione delle incertezze che ancora caratterizzano queste realtà. Si evidenzieranno le barriere che ancora si frappongono tra la situazione attuale e l’entrata sul mercato del truck platooning, si confronteranno gli studi riguardanti la modellazione delle manovre del platoon, il rapporto tra questo e l’infrastruttura ed i risparmi legati alla riduzione delle emissioni.

Una volta definito quanto più possibile il quadro in cui si sta delineando il truck platooning, tenendo sempre presenti le tempistiche ipotizzate dai principali stakeholders, si esprimeranno considerazioni su come questo sistema possa beneficiare dei C-ITS Day 1, quei servizi di mobilità cooperativa che la C-ITS platform promossa dall’unione europea ha identificato come già maturi dal punto di vista tecnologico ed in grado di produrre il maggior numero di benefici. Questi C-ITS Day 1 sono riportati nella seguente tabella stilata nel documento [74].

#	Day 1 Services
1	Emergency electronic brake light
2	Emergency vehicle approaching
3	Slow or stationary vehicle(s)
4	Traffic jam ahead warning
5	Hazardous location notification
6	Road works warning
7	Weather conditions
8	In-vehicle signage
9	In-vehicle speed limits
10	Probe vehicle data
11	Shockwave damping
12	Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA) / Time To Green (TTG)
13	Signal violation/Intersection safety
14	Traffic signal priority request by designated vehicles

Figura 1.1:List of C-ITS Day 1

Day 1 implica la loro implementazione ed entrata nel mercato con un orizzonte temporale del 2019. Come si illustrerà nel capitolo due, si stima che l'entrata nel mercato del truck platooning avverrà attorno al 2020 ed utilizzerà lo stesso tipo di connessione utilizzato dai C-ITS per comunicare, le potenzialità presentate dal dispiegamento congiunto di questi due sistemi, quindi, sono tanto più elevate a fronte del fatto che la loro interazione è completamente gratuita e realizzabile senza bisogno dell'aggiunta di altri componenti tecnologici al di fuori di quelli già necessari al truck platooning per funzionare. I due sistemi sono quindi in grado di enfatizzare i reciproci benefici ed aumentare le proprie potenzialità in seguito all'uso congiunto, il truck platooning implica infatti un maggior numero di veicoli connessi dispiegati sull'infrastruttura e, quindi, un maggior flusso di informazioni, molti dei C-ITS Day 1 a loro volta sono in grado di fornire indicazioni utili al platoon ed aumentare i benefici derivanti dall'uso di questa tecnologia in modo più consapevole e funzionale rispetto lo stato del traffico circostante e dell'infrastruttura.

Nel secondo capitolo, quindi, si analizzeranno tutti gli aspetti fondamentali al funzionamento del truck platooning, tenendo presenti le specificità dei vari territori ed attori coinvolti e la continua evoluzione del sistema. Si è cercato, infatti, di non privilegiare una visione piuttosto che un'altra ma di mantenere uno sguardo generale sulla realtà in divenire in cui non sono ancora stati posti molti punti fissi e sono pochi i capisaldi

che possono dirsi completamente definiti. Si analizzeranno molteplici studi di cui si sintetizzeranno i più significativi, riportando alla fine di ognuno gli input ipotizzati e gli output ottenuti per delineare degli ordini di grandezza caratteristici e dei range di variazione dei valori che possono costituire un punto di partenza nella definizione di ulteriori lavori di ricerca. Si evidenzieranno le ipotesi semplificative più impattanti e le considerazioni dei vari autori per quanto riguarda le tematiche ancora da affrontare e perfezionare.

Nel terzo capitolo, invece, si analizzeranno brevemente gli use cases dei C-ITS Day 1, se ne descriveranno le applicazioni possibili e, sulla base di quanto appreso dall'analisi bibliografica e concluso nel secondo capitolo, se ne ipotizzeranno i possibili utilizzi in concerto con il sistema del truck platooning, evidenziando requisiti per l'implementazione congiunta e potenziali benefici derivanti.

2.Truck Platooning

2.1 Funzionamento e sviluppo della tecnologia

Il truck platooning, come tecnologia, è stato studiato e perfezionato per decenni. Attualmente, infatti, è già possibile comporre un platoon di veicoli pesanti in grado di circolare su strade pubbliche insieme ad altri veicoli a guida tradizionale, come è stato dimostrato durante l'*European Truck Platooning Challenge 2016* [24]. Come si vedrà in seguito sono altri gli aspetti che ancora non hanno permesso a questa soluzione di entrare nel mercato, prima di analizzarli uno ad uno, però, è opportuno descrivere in dettaglio il funzionamento di questa tecnologia.

L'elemento base è il platoon, un insieme di veicoli interconnessi di cui quello in testa viene condotto tradizionalmente da un conducente, i veicoli seguenti ricadono nei livelli di automazione L2 o L3 (Classificazione NHTSA [61]). Si evidenzia come nel presente lavoro si utilizzerà l'espressione "guida tradizionale" per indicare veicoli condotti da una persona fisica senza che alcun componente tecnologico assuma il completo controllo delle funzioni di frenata, sterzata o accelerazione, ricadendo quindi nel livello L0 definito in [61]. Un veicolo pesante L2 facente parte di un platoon è fornito, invece, almeno di CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control) che ne regola automaticamente la velocità in base al valore trasmesso, tramite wifi, dal veicolo precedente. In questo modo non solo si ottiene una marcia più regolare, con meno accelerazioni e decelerazioni, ma è possibile ottenere un distanziamento dei veicoli molto ridotto, bypassando i normali tempi di reazione umani che, a velocità di 80 km/h, implicano alcuni metri di spazio. Un veicolo L2 può essere equipaggiato, inoltre, con un componente tecnologico come il lane centering in grado, in alcuni scenari limitati, di permettere al conducente di uscire dal loop di guida e non tenere le mani sul volante (è necessario, però, che sia pronto in qualsiasi momento a riprendere il controllo del veicolo). Attualmente tra un veicolo e l'altro in un platoon il gap temporale può essere ridotto fino ad un valore di 0,5 secondi garantendo comunque gli standard di sicurezza e gli spazi di frenata ma, entro il 2020, alcune stime indicano possa arrivare a 0,3 secondi [60] (a patto di ignorare le

problematiche legate al confort dei conducenti ed all'accettabilità da parte degli altri utenti della strada). Per gap temporale si intende un tipo di distanziamento che, in funzione della velocità di marcia tenuta dai veicoli, indica il Δt in cui il following vehicle occupa la posizione tenuta dal leading vehicle nell'istante iniziale. Un veicolo L3, invece, oltre ad essere fornito di CACC affida a componenti tecnologiche anche il controllo laterale (come avvenuto nel progetto KONVOI, in Germania), in questa configurazione gli altri conducenti assumono solo un ruolo di supervisione ed il sistema non richiede che questi siano pronti, in ogni momento, a riassumere il controllo senza preavviso come avviene per il livello L2.

Tra i veicoli le informazioni vengono trasmesse tramite DSRC, dedicated short range communication, che utilizzano una banda di 5.9 GHz ed un dedicato IEEE 802.11p. Il range massimo raggiungibile è di 1000 m e le informazioni inviate possono riguardare lo stato e la velocità del veicolo, la situazione del traffico di fronte al platoon, il percorso previsto, eventuali anomalie e molto altro. La connessione necessaria per la formazione del platoon segue gli standard ETSI (European Telecommunications Standards Institute) e deve essere perfettamente interoperabile tra tutti i veicoli equipaggiati, indipendentemente dal marchio, e con tutti gli altri sistemi C-ITS. I sistemi di assistenza alla guida che possono essere più frequentemente implementati in un platoon sono i seguenti: CACC, Forward Collision Warning, Lane Change Assist, Here I Am e Traffic Jam Assist.

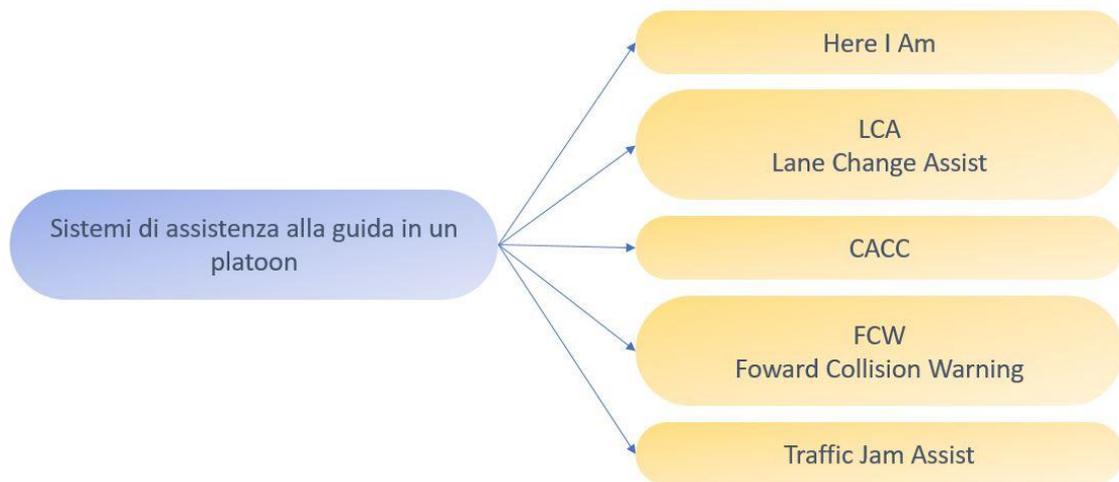


Figura 2.1: Tecnologie di assistenza alla guida

Tutti i componenti tecnologici elencati sono attualmente disponibili sul mercato, inoltre i loro costi di acquisto ed installazione hanno un'incidenza molto più bassa su un veicolo pesante che su un autoveicolo. Questo è uno dei tanti motivi per cui il truck platooning può diventare una realtà prima degli altri sistemi e fare da apripista all'intera realtà dei C-ITS.

“CV [Connected Vehicle] is more significant for heavy commercial vehicles than for light vehicles because the organized nature of heavy vehicle operations benefits more from connectivity. Fleets have an important role to play in deploying the technology, engaging with smart cities and communities, establishing connected corridors and precincts, and developing new accommodations for heavy vehicles, including signal priority and truck parking.”
 (Evolution of Technology for Commercial Vehicle Safety - Sweatman P. 2017)

“The electronic equipment needed to automate a truck should not be very different from equipment needed to automate a passenger car, since its functions are essentially the same. It means that the cost of automated system for an ACT should be almost the same as a passenger car. However, a heavy truck would typically cost much higher than a passenger car. This factor makes the potential

economic return from an investment in automation equipment significantly more attractive for a truck than for a passenger car.”

(Design and Control of Automated Truck Traffic at Motorway Ramps. – Tabibi M. 2004)



Figura 2.2: Orizzonti temporali – TNO 2015 Truck Platooning driving the future of transportation

In quest’ottica il camion diventa un veicolo connesso, capace di scambiare informazioni con gli altri veicoli (comunicazione V2V), con l’infrastruttura (comunicazione V2I) e con server esterni di gestione ed organizzazione del servizio (comunicazione tramite Cloud). Questa trasformazione apre però diverse tematiche. In primo luogo è necessario definire le prestazioni minime della connessione utilizzata, per evitare interruzioni del flusso di informazioni in momenti cruciali, ed accertarsi che tutti i gli utilizzatori di questa tecnologia vi si attengano. Inoltre bisogna che i dati trasmessi siano protetti da eventuali furti o manomissioni, la proprietà stessa di questi Big Data è una questione ancora aperta. Le case produttrici dei veicoli, attualmente, ne rivendicano la completa proprietà mentre i potenziali fornitori di servizi legati all’uso di un server esterno auspicano almeno una parziale condivisione. Per quanto riguarda i requisiti di connessione richiesti dalla tecnologia del truck platooning, lo studio AUTO-MATICA della fondazione Filippo Caracciolo [42] identifica il livello C-2 che riguarda i servizi relativi alla sicurezza attiva di tipo cooperativo, “safety critical”, basati su comunicazioni WI-FI 802.11p con standard ETSI ITS-G5. Nello stesso studio si evidenzia come la connessione debba essere interoperabile, cioè capace di comunicare con tutti i tipi di veicoli, con l’infrastruttura, i

server e qualsiasi altro possibile interlocutore, questo per usufruire al massimo di tutti i potenziali benefici.

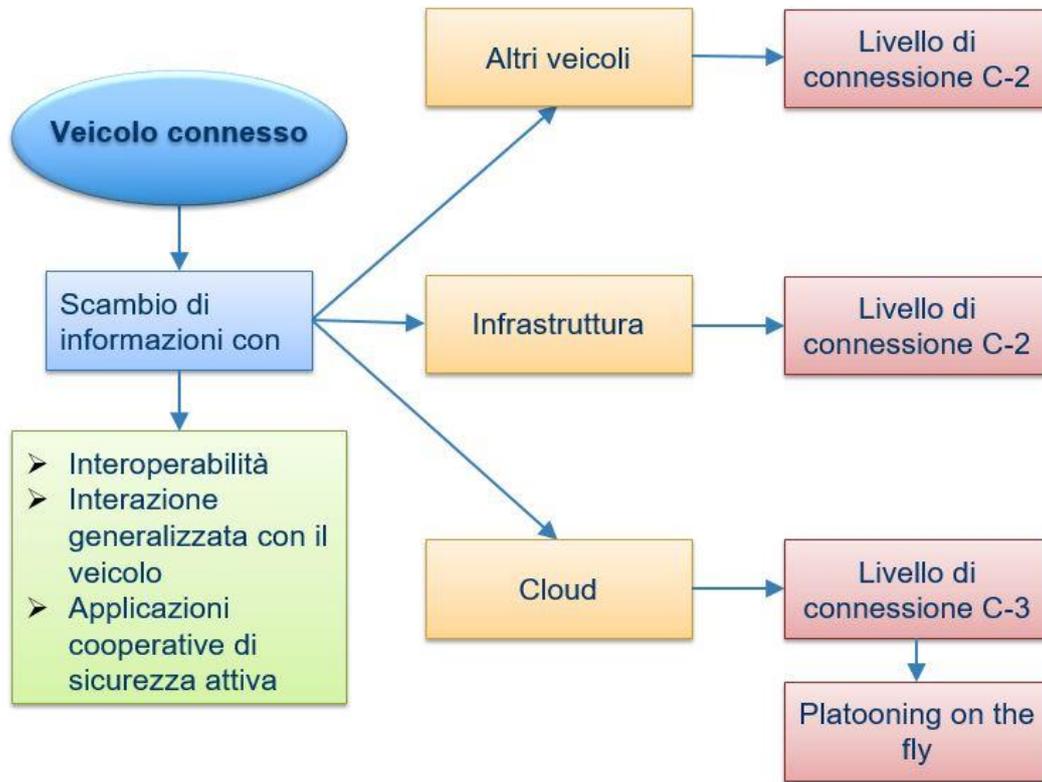


Figura 2.3: Connessione e Platoon

Generalmente più è elevato il grado di automazione del sistema, maggiore si richiede sia la sicurezza intrinseca che questo è in grado di assicurare. Il truck platooning non fa eccezione e, per essere un sistema “fail-safe”, è necessario ci sia una certa ridondanza nei sistemi di raccolta delle informazioni. Per questo motivo un veicolo pesante attrezzato per il platooning non è dotato solamente dei sistemi DSRC ma può avere anche radar, lidar, GPS, sistemi di navigazione inerziale, sensori ad infrarossi, laser e videocamere. Nelle figure seguenti è schematizzato l’equipaggiamento di un camion Daimler dedicato al truck platooning.

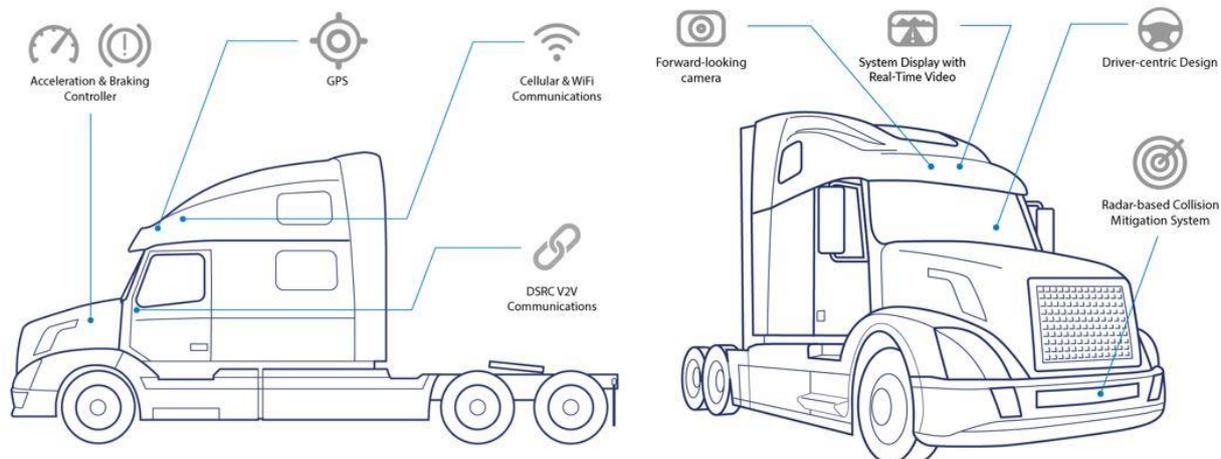


Figura 2.4: Daimler Truck - www.daimler.com

2.2 Benefici del truck platooning

I benefici derivanti dalla tecnologia sono molti e coprono ambiti diversi. In questo paragrafo si darà un inquadramento generale dei motivi principali per cui può risultare conveniente investire in questa tecnologia, i più importanti saranno in seguito trattati ognuno in un paragrafo dedicato. Molti dei benefici attesi sono legati alla riduzione del distanziamento, da ora in poi definito come headway, la riduzione dei consumi ad esempio è dovuta alla mancata formazione dei vortici d'aria tra un camion e l'altro. Il calo della resistenza al moto per i vari veicoli dipende dall'headway tenuto, dal numero di veicoli e dalla loro posizione nel platoon, il primo camion è quello che subisce sempre benefici minori. Un altro fattore che contribuisce a diminuire i consumi di carburante è il regime di marcia più regolare tenuto dai veicoli pesanti a guida semiautomatica che, per mantenere l'headway desiderato, grazie al CACC non devono più accelerare e frenare come accade nel caso della guida tradizionale. La riduzione delle emissioni ha sia una valenza sociale, costituita dall'abbattimento di VOC, PM, CO₂, ed NO_x, sia una valenza economica. Davide Brizzolara ed Andrea Toth riportano in [11] di alcuni studi in cui i

consumi dovuti alla resistenza dell'aria possono arrivare fino al 50%, ovviamente un valore del genere serve solo a dare un inquadramento delle possibilità poiché il risultato stesso dipende dalle condizioni atmosferiche, dalla densità dell'aria, dalle condizioni di traffico, dalla velocità, dall'headway scelto per il platoon e da molti altri fattori. Sempre nello stesso articolo gli autori riportano che il trasporto su strada sia responsabile per almeno il 72% delle emissioni in Europa, di questo un quarto è imputabile al trasporto su veicoli pesanti. Se a questi valori si associa quanto riportato da Kuo-Yun Liang, Jonas Mårtensson e Karl H. Johansson in [36], cioè che il costo del carburante rappresenta circa un terzo del costo operativo di un veicolo pesante, si capisce come oltre ai benefici sociali siano rilevanti anche quelli economici per le imprese che adottano questa tecnologia. Anche questo tipo di benefici è fondamentale perché è il fattore in grado di spronare maggiormente le aziende di trasporto ad investire nel truck platooning, una volta che questo sarà disponibile sul mercato. Questo orizzonte temporale costituito dai primi mesi dall'implementazione del sistema su strade pubbliche è il più delicato, quello in cui l'innovazione deve essere supportata da un'azione decisa di tutte le parti in causa e degli organi politici. Le prime aziende ad adottare la tecnologia, infatti, sono le più a rischio in quanto i benefici derivanti dal platooning aumentano in maniera rilevante all'aumentare del parco veicolare dedicato, in questa fase, quindi si ha la classica "chicken-egg situation" che durerà tanto meno quante più saranno le aziende che implementeranno il sistema sui loro veicoli.

Un'altra importante potenzialità del truck platooning è la possibilità di "recuperare spazio" sull'infrastruttura. Praticamente tutte le stime riportano come il trasporto stradale aumenterà nei prossimi decenni, di conseguenza non possono che aumentare i fenomeni di congestione a parità di chilometri di infrastruttura disponibili. L'ampliamento dell'infrastruttura non è di certo la soluzione ottimale, in quanto comporta erosione di spazi e cospicui investimenti, permettere ai veicoli pesanti di viaggiare con un headway ridotto, invece, può portare ad un risparmio anche di decine di metri. Ad esempio due veicoli a guida tradizionale mantengono, tra loro, un gap temporale che va da 1,2 a 1,5 secondi. In un platoon tale valore può calare fino a 0,5 secondi che, ad 80 km/h, vuol dire un headway di 11 metri a fronte di un valore tradizionale di 26÷33 metri. In un caso simile un platoon di quattro veicoli pesanti, di cui si può ipotizzare una lunghezza di 16 metri, occuperebbe 97 metri a fronte dei 142÷163 metri [1]. Ancora una volta si evidenzia il

valore indicativo di questi calcoli che verrà approfondito in paragrafi specifici e che, in questa sede, vuole solo dare delle grandezze a cui fare riferimento in una realtà in continua evoluzione come il truck platooning. Nell'ambito della capacità dell'infrastruttura ricade anche la capacità dei veicoli distanziati tramite CACC di assorbire parte delle shockwave e ritardare i fenomeni di congestione conseguenti [55]. Poiché l'headway non è mantenuto da una persona, infatti, il regime di marcia in situazione di traffico denso non è caratterizzato dal tipico susseguirsi di accelerazioni e frenate.

Una delle più grandi potenzialità del truck platooning si esplica quando, sopra le singole imprese di trasporto, si impone un organismo *super-partes* che ha la funzione di organizzare la formazione dei platoon anche tra imprese diverse ma con **vettori che percorrono le stesse direttrici negli stessi archi temporali**. I benefici derivanti dal truck platooning sono tanto maggiori quanto è lungo il tratto percorso in un platoon, per questo motivo le potenzialità maggiori della tecnologia si ottengono quando camion di vettori differenti possono accodarsi l'uno a l'altro e le occasioni di formazione di un platoon sono diverse e localizzate in più punti della rete stradale. Un **Platooning Service Provider** dovrà essere in grado di calcolare le combinazioni più convenienti, orchestrare il punto di incontro tenendo conto delle condizioni del traffico e ripartire i benefici così ottenuto tra i vari partecipanti, stabilendo sulla base di modelli di ottimizzazione in quali casi convenga formare un platoon ed in quali, invece, convenga al singolo veicolo proseguire per il suo percorso.

L'ultimo campo in cui possono esplicarsi i benefici del truck platooning è, socialmente, anche il più rilevante: quello della sicurezza. Come riportato da Robbert Janssen et al. in [35], nel 90% degli incidenti è coinvolto il fattore umano, si dà per scontato che la tecnologia del CACC applicata al platooning, al momento dell'entrata nel mercato, sia perfettamente sicura e fail-safe e, quindi, molto più affidabile dei riflessi umani. L'headway ridotto si ottiene, infatti, bypassando i tempi di reazione del conducente ed attivando la fermata non appena questa viene comandata dal CACC. Considerazioni del genere fanno inoltre supporre un possibile, nuovo e più conveniente regime assicurativo che costituisce un ulteriore incentivo per i produttori ed utilizzatori di veicoli pesanti, se pubblicizzate correttamente, inoltre, sono in grado di diminuire la diffidenza dei conducenti nei confronti della nuova tecnologia. L'ambito assicurativo introduce però

uno dei molteplici fronti ancora aperti: l'attribuzione delle responsabilità in caso di avaria del sistema.



Figura 2.5: Benefici derivanti dal truck platooning

Come riportato in figura 2.5, un altro beneficio che è necessario venga pubblicizzato adeguatamente al momento dell'entrata del sistema nel mercato è l'impatto sulla qualità del lavoro dei conducenti. Se è vero, infatti, che un giorno questo tipo di tecnologia sarà in grado di ridurre in modo significativo il numero dei conducenti di veicoli pesanti, è anche vero che con gli orizzonti temporali ipotizzati dai principali stakeholders questa tematica non si presenterà sicuramente nel prossimo ventennio e permetterà di rendere meno impegnativo e magari più attraente il lavoro del conducente di camion per il quale, al giorno d'oggi, la domanda supera consistentemente l'offerta.

“Trucking as we know it today is a highly labour-intensive industry. We face a shortage of truck drivers. In this regard, truck platooning technology presents us with

an opportunity to boost productivity in both the port sector and the trucking industry. It will also open up opportunities for truck drivers to take on higher-skilled roles as fleet operators and managers”, Pang Kin Keong, Permanent Secretary for Transport and Chairman of the Committee on Autonomous Road Transport in Singapore (CARTS). [84]

2.3 Barriere e tematiche ancora aperte

Nonostante la tecnologia sia ormai matura e pronta per passare ad una diffusa validazione del truck platooning tramite test sulle strade pubbliche, il processo è rallentato da tematiche diverse ed afferenti a più campi di competenze.

Un problema rilevante di questa realtà è la grande quantità di parti in causa, da qui in poi stakeholders, coinvolti:

- Produttori dei veicoli
- OEMs, original equipment manufacturers
- Vettori e spedizionieri
- Conducenti dei mezzi pesanti
- Altri utenti della strada
- Gestori delle infrastrutture, autorità stradali nazionali e regionali
- Organi e decisori politici
- PSP, platooning service provider
- Assicurazioni

Tutte queste figure hanno un ruolo rilevante nello sviluppo della tecnologia nei prossimi anni ed è necessario che agiscano in maniera armonica ed organica nonostante la potenziale conflittualità dei loro interessi. Diversi produttori di veicoli pesanti, ad esempio, è necessario adottino tecnologie interoperabili e comunicanti tra loro, nonostante siano concorrenti sul mercato. **Il truck platooning, inoltre, per sua natura è adatto a servizi di trasporto transnazionali** ed è, perciò, necessario che tutte le nazioni

sulle grandi direttrici siano intenzionate ad utilizzare ed incoraggiare questo tipo di soluzione.

Il rischio di differenze a livello nazionale, dovuto ad una comunicazione inadeguata o ad una mancata gestione a livello europeo, può portare ad un livello di servizio sub-ottimale. In questo modo non si otterrebbero tutti i possibili benefici sociali, economici ed ambientali offerti dalla tecnologia per mancanza di procedure comuni per la sicurezza, i test di validazione ed i requisiti di performance. Inoltre per un tragitto del platoon senza problemi, la legislazione dei vari stati deve essere armonizzata nei seguenti ambiti:

- Distanze di sicurezza e tempi di riposo
- Velocità massime del platoon
- Peso massimo lordo
- Possibilità di circolazione in guida semiautomatica.



Figura 2.6: Armonizzazione della legislazione

E' particolarmente importante anche l'unificazione delle procedure di deroga o, almeno, un comune sistema di classificazione delle prestazioni richieste e degli standard minimi di sicurezza necessari per poter eseguire test su strade pubbliche. Durante l'European Truck Platooning Challenge, ad esempio, un OEM ha dovuto richiedere sei deroghe diverse per guidare attraverso tre Länder tedeschi e cinque nazioni³. Questa situazione

³ European Truck Platooning Challenge 2016 Lesson Learnt

rende un'impresa particolarmente impegnativa effettuare test e dimostrazioni a livello europeo e, in mancanza di interventi, rallenterà l'entrata a regime del truck platooning.

“A next step envisioned was to introduce a set of procedures to the European authorities as a possible future certification standard for automated transport systems” van Dijke & van Schijndel

Lo sviluppo di procedure comuni per i field test è in grado di facilitare l'introduzione di queste tecnologie su strade pubbliche in ognuno dei paesi facenti parte dell'Unione, limitare l'uso pubblico di queste tecnologie agli stati più all'avanguardia nel settore, nei primi anni, rischia di rendere il mercato europeo dei C-ITS e del truck platooning risibile nei confronti degli altri grandi mercati come quello americano e quello asiatico. Una situazione del genere può condurre facilmente all'imposizione di standard extraeuropei al mercato dell'unione, per questo è fondamentale sviluppare un forte impiego interno e diffuso a tutti i paesi dell'unione.

Allo stesso modo è spesso impegnativo anche a livello nazionale organizzare field test su strade pubbliche, in Italia ad esempio non è definita una procedura da adottare per richiedere una deroga ed effettuare un test su strada, mancano perciò tempi certi nel pianificare questo tipo di attività. Si riporta l'esempio di CityMobil a Roma in cui il ministero delle infrastrutture ha accettato i risultati delle analisi sulle criticità, i possibili guasti ed eventi incidentali conseguenti per dare il via alla dimostrazione. Altri paesi come l'Olanda sono invece pionieri in questo campo ed hanno già regolamentato nella loro legislazione le procedure necessarie ad ottenere le deroghe per i “field test”, garantendo un quadro normativo e delle tempistiche certe.

Per quanto riguarda la normativa europea è opportuno far notare che le uniche modifiche necessarie per permettere la circolazione dei platoon sono quelle della legislazione di Vienna (come riportato in [42]) che attribuisce le responsabilità incidentali sempre in capo al conducente. Un'importante parametro da uniformare è lo spazio sull'infrastruttura da dedicare al truck platooning, alcune delle nazioni partecipanti all'European Truck Platooning Challenge, infatti, ne hanno limitato la circolazione sulla prima corsia, inibendo completamente la manovra di sorpasso (Belgio ed Olanda).

Un'altra tematica importante è il livello di copertura che la rete raggiunge in tutti i punti dell'infrastruttura. Le comunicazioni V2I (vehicle to infrastructure) devono essere implementate per tutti i servizi C-ITS, non solo per il truck platooning, ed è necessario individuare i punti in cui è possibile si abbia perdita del segnale e le possibili conseguenze. Sempre per quanto riguarda le infrastrutture, alcuni punti risultano critici per il truck platooning sono: rotatorie, viadotti, gallerie e rampe. Nel caso delle gallerie i problemi sono soprattutto relativi alla copertura raggiunta ed alle analisi del rischio in funzione della lunghezza del platoon, sui viadotti invece un perfetto allineamento dei mezzi ed un headway ristretto possono aumentare di molto il carico puntuale esercitato sull'elemento di infrastruttura. Il problema delle rampe è complesso, tanto che più di un approccio è stato proposto per affrontarlo, e verrà trattato approfonditamente nei paragrafi seguenti. Per quanto riguarda l'interferenza di un platoon abbastanza lungo in una rotonda, il possibile blocco dei rami affluenti e la tematica dell'immissione, non sembra esserci al momento una bibliografia adeguata ed un possibile approccio risolutivo. Questo perché, probabilmente, nelle prime fasi dell'entrata in commercio di sistemi di truck platooning, solo le direttrici principali saranno interessate dal fenomeno e le rarissime rotonde sul percorso saranno evitate con opportune deviazioni, **in un orizzonte temporale più ampio, però, è prevedibile che piccoli platoon potranno viaggiare su porzioni sempre maggiori della rete e la tematica diventerà oggetto di studio ed approfondimento.**

A pesare, inoltre, sull'attuale situazione del truck platooning, è la mancanza di un business case adeguato che tenga conto delle differenti legislazioni o delle varie fasi dall'entrata della tecnologia nel mercato alla situazione di regime su un orizzonte temporale maggiore. In Study on the Deployment of C-ITS in Europe: Final Report [8], redatto dalla Ricardo Energy&Environment viene riportato quanto segue:

*“Impact and cost data for vehicles other than passenger cars: Collection of input data for the cost-benefit analysis in this study highlighted the shortage of publically available data for freight vehicles and public transport, despite several European projects trialling C-ITS services in these types of vehicles. **In the majority of cases, the analysis in this project assumed costs and impacts (safety,***

fuel consumption, emissions, and time related impacts) would be similar for all types of vehicles. Ideally, vehicle specific data collected from a range of FOT projects would be used for improved estimation of the potential costs and benefits of C-ITS services.”

Un adeguato business case può invogliare un maggior numero di produttori ad investire sulla tecnologia del truck platooning, aumentano di molto i benefici ottenuti sin da subito ed evitando una situazione “chicken-egg” in cui i primi utilizzatori non rientrano delle spese sostenute a causa del limitato numero di veicoli con cui formare il platoon lungo i tragitti. Un business case, inoltre, può tener conto delle opportunità costituite da un PSP, di cui si tratterà dettagliatamente in seguito e, soprattutto, può iniziare a delineare un sistema di ripartizione dei benefici per chi segue le direttive del service provider, limitando sin da subito i problemi di fiducia e le reticenze delle singole imprese a condividere i loro dati con figure esterne. In quest’ambito è importante determinare le implicazioni su costi e benefici dei diversi scenari di implementazione, legati a limiti tecnologici, sociali, infrastrutturali (aspetti che verranno approfonditi in seguito) ma anche legali nei diversi paesi.

La problematica forse più rilevante, però, è legata alla scarsità di parametri certi ed accettati da tutti su cui impostare studi economici e modellazioni del traffico. Per fare un esempio non è possibile indicare, allo stato delle cose, di quanti veicoli debba esser composto un platoon nelle varie situazioni così come non è stabilito un valore ottimale dell’headway che tenga conto della riduzione delle emissioni, dei problemi legislativi e del comfort dei conducenti. Lo scopo della presente tesi è elaborare, sulla base della bibliografia analizzata, quali siano i valori ottimali nei vari scenari, raggruppando tutti quelli assunti nei vari studi per i parametri più rilevanti e, ove possibile, stabilire quali siano i valori opportuni da utilizzare negli studi futuri in base al contesto analizzato. Anche la modellazione del platoon e delle sue manovre è stata effettuata in maniera circoscritta ad alcune realtà ed in alcuni punti specifici dell’infrastruttura e, in maniera più o meno analoga, si cercherà di confrontare le metodologie utilizzate, i risultati ottenuti, le ipotesi adottate ed i parametri stimati per generalizzarne le considerazioni in funzione del tratto di infrastruttura da analizzare.

Nella parametrizzazione del truck platooning bisogna sempre tener conto anche dei limiti costituiti dalla percezione dei conducenti e degli altri utenti della strada. M. Larburu, J. S. and D. J. Rodriguez in “Human factors’ aspects in dual mode transport systems” [39] riportano come circa il 73% dei partecipanti maschili all’esperienza si sia sentito poco a suo agio con un gap nel platoon di 16,55 m ed in pericolo sotto i 6,5 m. Questi valori comportano delle evidenti limitazioni che vanno contro le potenzialità del truck platooning, probabilmente i conducenti dovranno avere patenti dedicate e seguire corsi in materia. Anche in questo caso, però, bisognerà pubblicizzare i benefici sociali derivanti dal truck platooning per evitare che i guidatori degli altri veicoli insorgano contro questi platoon molto lunghi che comunque possono impedire, in alcuni punti, il cambio di corsia, l’immissione o l’uscita dal ramo stradale. Questo tipo di rigetto da parte degli elettori, infatti, non può che diminuire il supporto politico verso il truck platooning. Un altro rischio è che i conducenti stessi, per la paura solo parzialmente giustificata di perdere il proprio posto di lavoro, insorgano e boicottino la tecnologia nei suoi stadi iniziali.

La problematica dei Big Data e della loro proprietà non sarà approfondita ulteriormente nel corso della tesi, si riporta solo quanto descritto nello studio Auto-matica della fondazione Filippo Caracciolo [42]:

“Due sono le posizioni in netto contrasto su questo punto: da un lato i costruttori di veicoli, che danno un forte peso ai requisiti di sicurezza e responsabilità, intendono che il server esterno sia una “estensione” del veicolo (il concetto va sotto il nome di “extended vehicle”) e ricada quindi sotto la loro piena responsabilità (e sono pronti a garantire l’accesso al veicolo da parte di fornitori di servizi esterni sulla base di accordi B2B); dall’altro lato i fornitori di servizi (in primis i servizi di aftermarket), che partono dal requisito di un accesso aperto e indiscriminato, chiedono un intervento normativo e, come minimo, che l’eventuale server sia a proprietà e gestione “condivisa””

La posizione dei produttori dei veicoli è esposta nel documento [83], in cui si evidenzia come un accesso non controllato da parti terze può costituire un un rischio per quanto riguarda safety e security:

“Even uncontrolled third-party access to vehicle functions or data that are not directly security-relevant could lead to risks through networking: enabling vehicle

theft and remote door unlock, for example, as well as creating opportunities for fraud, such as mileage manipulation, improper creation and misuse of movement profiles or sale of personal data. Similarly, it must be avoided that critical safety functions such as braking would be affected negatively by the use of in-vehicle resources for third-party applications. To limit such risks, third parties shall not have direct in-vehicle access to data. Instead, vehicle manufacturers will communicate the relevant vehicle data in a secure manner to an off-board facility from where third parties can access the data.”

Appare quindi evidente come spesso le varie tematiche ancora aperte siano profondamente intrecciate tra loro e rendano ancora più difficile armonizzare le necessità dei vari stakeholders coinvolti.

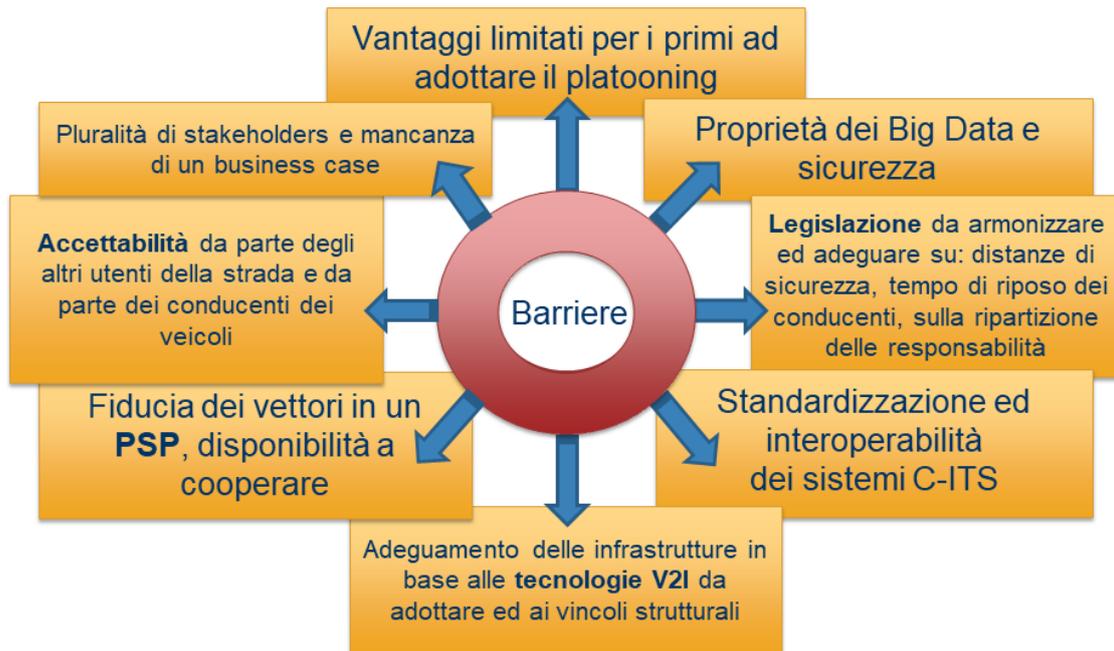


Figura 2.7: Barriere all'implementazione del truck platooning

2.4 Carburante, consumi ed emissioni

“Given current mobility issues and the urgency of reducing CO₂ we must seek creative and innovative solutions that maximise use of state-of-the-art technology. Platooning is only the start.” (Arthur van Dijk, TLN)

Come accennato nei paragrafi precedenti, il sistema del truck platooning è in grado di abbattere in maniera rilevante il carburante necessario ad un veicolo pesante per compiere il suo tragitto da un punto A ad un punto B. La tematica è centrale poichè, oltre gli evidenti benefici sociali derivanti da una riduzione delle emissioni, comporta cospicui risparmi per le imprese utilizzatrici. E' cruciale però che questi risparmi siano quantificabili con un certo livello di certezza, allo stato attuale ciò è reso difficile dall'aleatorietà dei parametri necessari ad una modellizzazione dei consumi e dalla necessità di applicare i modelli ad un determinato tratto di rete stradale definito e circoscritto. Può essere quindi molto difficile dare una stima dei consumi a priori o in generale, inoltre i benefici aumentano molto all'aumentare della penetrazione della tecnologia nel mercato ed in presenza di un Platooning Service Provider incaricato dell'organizzazione di un ampio parco veicolare equipaggiato. A complicare ulteriormente la quantificazione dei risparmi è il traffico circostante, la formazione del platoon infatti può essere ritardata, anche di molto, dalla presenza di altri veicoli tra un camion e l'altro, da possibile congestione e, soprattutto agli inizi, da una scarsa comprensione del fenomeno da parte degli altri utenti della strada. Nel presente paragrafo si cercherà di dare un inquadramento di tutti i lavori più importanti reperiti riguardanti la riduzione delle emissioni, di evidenziare le ipotesi assunte, le metodologie adottate, i parametri utilizzati ed i loro valori. Quindi si confronteranno i risultati evidenziando i fronti ancora aperti ed i possibili approfondimenti auspicati dalle varie parti in causa.

Il contributo maggiore al risparmio di carburante è dato dalla riduzione delle resistenze aerodinamiche. L'headway ridotto tra i veicoli, infatti, impedisce la formazione dei vortici d'aria tra un camion e l'altro, i benefici così ottenuti riferiti al singolo platoon

variano in base al distanziamento scelto, alla posizione del camion lungo il platoon ed alla densità dell'aria.

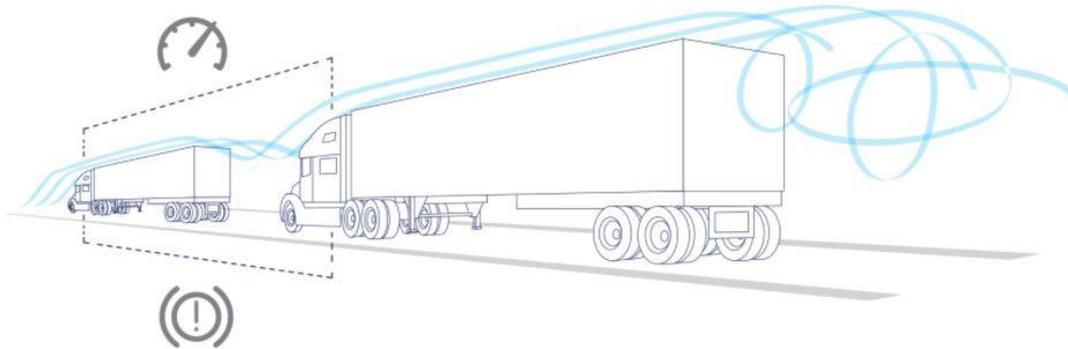


Figura 2.8: Peloton-Aerodinamica platoon

Nella bibliografia che si andrà ad analizzare, quindi, sarà necessario evidenziare i seguenti elementi:

- Headway
- Numero di veicoli nel platoon
- Velocità del platoon
- Metodo utilizzato per gestire l'organizzazione dei platoon e la loro formazione

I primi tre sono parametri che, se scelti oculatamente, permettono di massimizzare la riduzione di emissioni. L'ultimo punto invece rappresenta una scelta fondamentale, allo stato attuale infatti è stimato che i fenomeni spontanei di truck platooning siano l'1,2% che corrispondono ad un risparmio di carburante dello 0,07% rispetto al caso di totale assenza di platooning [36]. Molti dei conducenti, infatti, sono consapevoli dei benefici legati ai consumi ottenibili mantenendo un distanziamento limitato da altri veicoli pesanti. Se però si ipotizza un servizio dedicato a coordinare il parco veicolare in viaggio, organizzarlo in platoon e regolare la velocità per ogni camion in modo da stabilire punti di incontro ottimali, la percentuale di veicoli coinvolti aumenta fino ad assumere valori rilevanti. Questo tipo di organizzazione, però, implica l'esistenza di un modello di ottimizzazione da applicare alla rete stradale che tenga conto della matrice origine destinazione dei camion coinvolti, i loro tempi di arrivo, lo stato del traffico e la redistribuzione dei benefici tra le varie imprese di trasporto partecipanti.

2.4.1 Fuel-Efficient Centralized Coordination of Truck Platooning (2016)

– Sebastian Van De Hoef

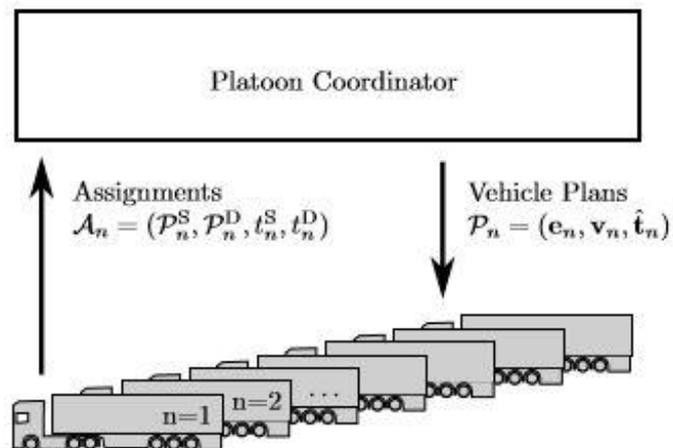


Figura 2.9: Platoon Coordinator - Sebastian Van De Hoef

In questa tesi di laurea si affronta il problema di coordinare un parco di veicoli pesanti, ognuno dei quali ha un'origine, una destinazione, un orario di partenza ed un orario di arrivo. Il flusso di informazioni parte dal veicolo, passa per l'infrastruttura (tramite centraline che garantiscono la comunicazione V2I) per arrivare fino al "platoon coordinator" che computa un piano il più efficiente possibile dal punto di vista delle emissioni e lo rimanda al veicolo. Da questo organismo centrale, quindi, vengono confrontati i percorsi e, se quelli di due camion si sovrappongono anche solo parzialmente, viene valutata l'opportunità di formare un platoon. Poiché il processo è computazionalmente molto impegnativo, nella tesi viene proposto un approccio basato su "features", caratteristiche della tratta dei singoli veicoli, che vengono estratte e confrontate per determinare a priori quali coppie di veicoli hanno la possibilità di formare il platoon. Si parte dalla considerazione che, i veicoli, per incontrarsi debbano accelerare o rallentare ad un certo punto e per un tot di chilometri. Questo comporta evidentemente consumi maggiori per un certo tratto, è perciò necessario che il platoon viaggi abbastanza a lungo in formazione per far sì che valga la pena modificare il proprio regime di marcia.

Nel formulare il problema di ottimizzazione, per ogni veicolo viene definito un “vehicle plan” che consiste in un tragitto ed in una sequenza di velocità ed attimi temporali in cui questa cambia lungo l’infrastruttura. Un vehicle plan è considerato valido se permette al veicolo di giungere nel punto di arrivo entro il tempo limite senza che questo debba infrangere i limiti di velocità. La sequenza dei valori di velocità e dei tempi in cui questa cambia forniscono la posizione di ogni veicolo, questi possono formare un platoon quando la loro posizione nel modello è la stessa.

Una semplificazione assunta in questo studio è che il primo veicolo consumi esattamente quanto consumerebbe se viaggiasse da solo. In realtà non è così ed anche il leading vehicle consuma meno, anche se in maniera ridotta rispetto gli altri. In [15], ad esempio, i risultati dell’esperimento mostrano come la resistenza del primo veicolo decresca costantemente al calare dell’headway fino ad un certo valore, oltre il quale si mantiene costante. Il consumo di carburante per i following vehicles è stato implementato nel modello come segue:

$$F(\varphi_n, \pi_n) = \int_{t_n^S}^{t_n^A} f(\varphi_n(t), \pi_n(t)) \varphi_n(t) dt$$

Dove n è il veicolo ennesimo, φ è la velocità del tratto di strada, π è la traiettoria del platoon, t^S è il tempo di partenza del veicolo e t^A il tempo di arrivo. La funzione f è una generica funzione dei consumi di carburante in funzione della velocità e può essere ricavata analiticamente in funzione del tipo di veicolo considerato.

In questo caso si sono utilizzate le due funzioni di seguito riportate, la prima per il leading vehicle e la seconda per i following vehicle.

$$f_0(v) = 8,4159 * 10^{-6}v + 4,8021 * 10^{-5}$$

$$f_p(v) = 5,0495 * 10^{-6} + 8,5426 * 10^{-5}$$

E’ stato intenzionalmente ignorato il contributo del tipo di strada e del tipo di veicolo per non appesantire troppo la trattazione. La mancanza di parametri per quanto riguarda diversi modelli di camion, però, è ancora un ostacolo per la definizione di un business case affidabile ed una quantificazione a priori dei benefici ottenuti dal singolo camion per singolo viaggio. E’ inoltre fondamentale verificare che i veicoli in formazione abbiano capacità analoghe di accelerazione o decelerazione per evitare che accelerazioni minori

dei following vehicle portino ad un aumento dell'headway ed alla possibile disaggregazione accidentale del platoon.

Nel modello di ottimizzazione, quindi, si è definito il consumo di carburante totale tramite una semplice sommatoria su tutti i platoon formati e si è lavorato su come minimizzarlo. Come accennato precedentemente, poiché la complessità computazionale è elevata, si sono definite delle caratteristiche tramite le quali formare un primo set di veicoli in grado di unirsi in diversi platoon. Tale set è più ampio di quello reale, nel senso che vengono risparmiati alcuni falsi positivi da eliminare in una fase successiva, applicando su questo set, già parzialmente vagliato, l'algoritmo che confronta le rotte e le tempistiche.

Le caratteristiche possono essere basate su un intervallo, in questo caso ogni veicolo viene associato ad un intervallo, c'è un'intersezione tra due itinerari se gli intervalli generati dai due veicoli si sovrappongono. Le altre caratteristiche definite sono dette binarie. Una di queste caratteristiche è definita come una proiezione degli itinerari lungo una stessa direzione, se queste proiezioni non si intersecano in nessun punto allora i due itinerari non hanno alcun tratto in comune.

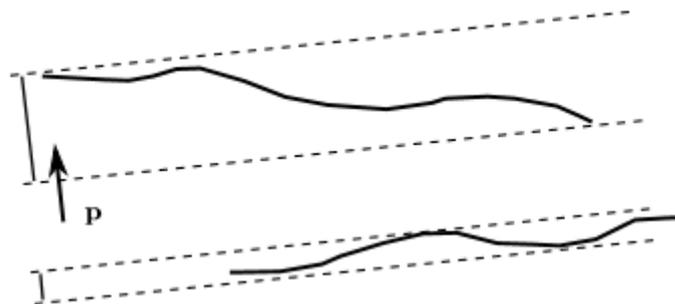


Figura 2.10: Esempio di "feature" binaria

Una seconda caratteristica binaria è costituita dall'orientazione dei vari rami che compongono l'itinerario, se due itinerari si sovrappongono deve esserci almeno un arco che abbia la stessa orientazione perché si possa formare un platoon. Questa caratteristica può essere resa più funzionale se ne viene implementata un'altra che scarti tratti di itinerario con la stessa orientazione ma con una lunghezza minore ad una certa frazione del percorso totale (come già accennato è necessario che il tratto percorso in formazione debba avere una lunghezza minima per risultare conveniente). E' importante che nessuna

delle caratteristiche implementate escluda possibili platoon, gli autori hanno considerato preferibile avere falsi negativi eliminabili con l'applicazione dell'algoritmo di controllo degli itinerari (branch and bound method). Una volta definita la soluzione dal platoon coordinator e trasmessa ai following vehicles, questi assumono il valore ottimale di velocità che gli permetta, con i minor consumi, di arrivare al punto di incontro nel tempo stabilito (è importante, per il funzionamento dell'algoritmo, che i leader vehicles non modifichino il loro regime di marcia). Vale anche la pena far notare che il problema di ottimizzazione in questione è NP-hard, ciò implica che non è possibile trovarne la miglior soluzione in assoluto ma, solamente, un ottimo locale che comunque, nella realtà delle cose, corrisponde ad un risparmio di carburante e ad una riduzione delle emissioni. **Questa difficoltà computazionale è stata riscontrata in tutti gli studi analizzati in bibliografia e dedicati alla definizione di un modello di ottimizzazione per la formazione dei truck platoons, ciò comporta semplificazioni necessarie nelle possibili simulazioni.**

Con l'impostazione appena riassunta si sono, quindi, eseguite delle simulazioni in uno scenario realistico su gran parte del suolo europeo. I percorsi più brevi per ogni vettore sono stati calcolati con l'Open Source Routing Machine ed un tratto massimo di 400 km (se un itinerario si è rivelato più lungo è stato diviso in più porzioni). La velocità massima è stata impostata ad 80 km/h, valore realistico ma che pone alcune problematiche nell'interazione con altri camion indipendenti come emerso nell'European Truck Platooning Challenge. Il margine di tolleranza per il tempo di arrivo è stato impostato a mezzora e la distanza minima percorsa in un platoon ad almeno 20 km. Una semplificazione importante e, probabilmente, la più impattante è il non aver considerato lo stato del traffico e le interazioni con gli altri utenti della strada.

L'output ottenuto dal modello matematico, con una velocità di riferimento di 80 km/h per la marcia del platoon (con un range tra i 70 ed i 90 km/h per tutta la marcia dei veicoli) è del 15,9% per i following vehicles. Questo valore si riferisce alla situazione ideale in cui il numero dei veicoli pesanti che possono formare vari platoon è sufficientemente ampio da massimizzare i benefici legati alle emissioni. Si è quindi applicato il modello ad una realtà come quella svedese, si sono considerati 2000 camion circolanti sulla rete stradale della Svezia in un intervallo temporale di due ore e si è ottenuta una riduzione dei consumi del 7,6%. In questo lavoro non si è posto un limite al numero di veicoli di cui è composto

un platoon, arrivando anche a considerare ventotto camion allineati, questa è un'ipotesi difficilmente veritiera, soprattutto nei primi anni dall'entrata di questa tecnologia sul mercato ed in mancanza di corsie dedicate.

Uno spunto interessante che emerge nelle pagine finali della tesi riguarda la fase di transizione che si ha tra 200 e 300 viaggi compiuti nell'intervallo di tempo considerato. Sembra infatti che con un numero di 300 viaggi l'algoritmo riesca ad organizzare i veicoli in modo da accoppiarli, ognuno, con il coordination leader più adatto in modo da formare tanti platoon di dimensioni ridotte e non pochi platoon molto lunghi.

Nelle conclusioni, inoltre, si evidenziano le tematiche ancora aperte per un modello di ottimizzazione basato sul risparmio di carburante. E' risultato necessario determinare che tipo di influenza ha la distribuzione spaziale e temporale dei viaggi da coordinare. **Per rendere ancora più appetibile questo tipo di soluzione coordinata alle imprese, infatti, è auspicabile rendere stimabile a priori il carburante risparmiato in base al viaggio che il camion della stessa impresa ha in programma.** Gli autori hanno inserito tra i lavori futuri l'analisi di ciò che accade se nel modello di ottimizzazione vengono implementate le varie perturbazioni che possono emergere dalle condizioni di traffico sulla rete, dal maltempo e dalle pause che gli autisti devono poter essere in grado di prendere. Questo vuol dire ripetere il calcolo dei piani per i following vehicles più volte ed adattare il loro comportamento col cambiare della situazione in modo dinamico. Un ulteriore approfondimento del modello può essere ottenuto implementando una funzione come quella del "rerouting", quantificandone la potenziale riduzione dei consumi legata alla soluzione del truck platooning. Un ultimo aspetto che gli autori auspicano venga esplorato riguarda l'accettazione di un platoon coordination system da parte dei conducenti e delle imprese. E' infatti plausibile che le informazioni del platoon coordinator abbiano carattere indicativo e non coercitivo, l'ottimizzazione dei consumi, quindi, è dipendente anche dall'attitudine dei conducenti a seguire le indicazioni ricevute.

	INPUT	OUTPUT
$V_{max\ platoon} [km/h]$	80	

<i>Lunghezza massima di un percorso [km]</i>	400	
<i>Massima lunghezza del platoon</i>	28	
<i>Distanza minima da percorrere in un platoon [km]</i>	20	
<i>Parco veicolare considerato nella simulazione</i>	2000	
<i>% carburante risparmiato ottenuto dalla simulazione di 2 h</i>		7,6%
<i>% massima di carburante risparmiato ottenibile dal modello per i FV</i>		15,9%

Tabella 2-1: Fuel-Efficient Centralized Coordination of Truck Platooning

2.4.2 Fuel-Saving Potential of Platooning Evaluated through Sparse Heavy-Duty Vehicle Position Data (2014) – Liang K., Mårtensson J., Johansson K. H.

In questo articolo viene analizzato il caso di circa 1800 veicoli pesanti in viaggio su una parte del territorio europeo ampia 500 km². In un altro lavoro degli autori (“When is it fuel efficient for a heavy duty vehicle to catch up with a platoon?”) viene messo in evidenza come, in genere, ad un veicolo pesante convenga accelerare per unirsi al platoon

se la distanza dalla sua destinazione risulta 17 volte o più rispetto quella che lo separa dal leading vehicle. In questo articolo si cerca di delineare un metodo con cui applicare uno schema di coordinazione per incrementare il numero di platoon formati, un obiettivo diverso dalla riduzione complessiva delle emissioni perseguito nel paragrafo 2.4.1. Tramite map-matching e tecniche per ipotizzare il percorso tenuto dal veicolo per andare dal punto A al punto B, quindi si analizzano tre possibili schemi di coordinazione con cui organizzare il catch-up del following vehicle. Questo può solo accelerare per raggiungere il leading vehicle che non è consigliabile rallenti oltre un certo limite per evitare che si formi un collo di bottiglia alle sue spalle, in grado di inibire la formazione del platoon.

I tre schemi di coordinazione considerati sono, quindi:

- Catch up coordination scheme
- Departure coordination scheme
- Transport coordination scheme

Anche in questo caso si sono trascurati i problemi delle diverse caratteristiche meccaniche dei veicoli, delle caratteristiche dell'infrastruttura e dei consumi variabili tra i vari modelli di veicolo. La funzione descrittiva dei consumi di carburante è la seguente:

$$f = K_E v^2 d \varphi(d_r)$$

In questo caso K_E è una costante di conversione dell'energia, v è la velocità e d è la distanza percorsa. φ è pari a 0,9 se il veicolo viaggia come following vehicle, 1 altrimenti ed è funzione di d_r , cioè dell'headway tenuto.

La tecnica del map-matching, introdotta prima, consiste nell'identificare in base alla posizione GPS del veicolo un insieme di archi nelle vicinanze su cui questo può trovarsi. Tra questi, in base al loro orientamento, alla loro vicinanza dalla posizione GPS ed alla direzione tenuta dal veicolo si identifica l'arco su cui questo si trova al momento. Questo approccio semplificato è stato utilizzato perché l'analisi oggetto dello studio ha riguardato solamente la rete autostradale che, in fondo, è anche la più conveniente nell'ambito del truck platooning (necessariamente impostato sulle lunghe distanze). Un'altra semplificazione adottata nello studio riguarda la scelta dei percorsi, per congiungere due punti posizione rilevati dal GPS si ipotizza tutti i veicoli impieghino il percorso più corto, con una velocità media mantenuta di 85 km/h.

Come scenario baseline, nell'articolo, si prende il caso della formazione spontanea dei platoons. Una volta determinati gli itinerari si interpola rispetto al tempo per determinare quali veicoli formino un platoon (cioè tengano una distanza inferiore all'headway stabilito almeno per due misurazioni GPS, inoltre la differenza di velocità tra i due veicoli non deve essere superiore a 5 km/h). E' da questo tipo di analisi che si ottengono i risultati prima citati: platooning spontaneo di 1,2% ed un risparmio di carburante di 0,07%. In questo caso si sono considerati 100 m come distanza sotto la quale considerare possibile la formazione del platoon.

Catch up coordination: Ogni volta che vengono registrate le misure GPS si verifica se due veicoli siano abbastanza vicini da rendere conveniente, a fronte di un regime di marcia accelerato (catch up), la possibilità di formare un platoon. La velocità massima che un camion può tenere per raggiungere il leading vehicle è fissata a 100 km/h, una volta unitosi al platoon però deve necessariamente uniformare la sua velocità a quella degli altri veicoli. Per verificare se al camion convenga accelerare e modificare il suo regime di marcia o ignorare il platoon e proseguire da solo, il modello confronta i due profili di velocità ed i corrispondenti consumi di carburante e, quindi, i costi. **Non è infatti realistico ipotizzare che un veicolo pesante aumenti i suoi consumi per formare un platoon che beneficerà altri veicoli potenzialmente appartenenti ad imprese concorrenti.**

Departure coordination: In questo caso si agisce sui tempi di partenza dei veicoli per coordinarli con altri veicoli e renderne possibile l'incontro e l'unione in platoon. L'elemento vincolante, in questo caso, è l'orario di arrivo previsto che non può essere ritardato per favorire il platooning dei camion. Una volta identificati due veicoli in partenza abbastanza vicini, se ne calcola il percorso comune, sempre con un margine di velocità al massimo di 5 km/h, e si calcola il carburante risparmiato. Se un veicolo può unirsi a più di un platoon si sceglie quello che comporta i risparmi maggiori, quindi si esclude tale veicolo dalle successive iterazioni di calcolo. Nell'utilizzare questo tipo di coordinazione si possono considerare anche pause per il leading vehicle, stop per i rifornimenti di carburante e partenze anticipate.

Transport coordination: In questo tipo di approccio non si parte più dalla posizione del singolo veicolo ma si esaminano singoli assi stradali. Se più veicoli entrano nel segmento

stradale in un intervallo temporale ristretto, questi veicoli possono formare un platoon. Per questo tipo di approccio gli autori hanno utilizzato un differente modello per quantificare i consumi di carburante.

$$f = K_E d_{road} (1 + (N - 1)\varphi) \text{ if } N \geq 2$$

$$f = K_E d_{road} \text{ if } N = 1$$

In questo caso N è il numero di veicoli entranti nel tratto stradale, K_E è la costante di conversione dell'energia, $\varphi = 0,9$ è la costante di riduzione dei consumi per i following vehicles e d_{road} è la lunghezza del tratto stradale considerato.

Nelle simulazioni effettuate, il numero di veicoli considerato è stato di 1773 nell'arco di 24 ore, per la maggior parte del tempo in contemporanea hanno viaggiato tra i 250 ed i 350 veicoli. Il totale dei chilometri percorsi è stato di 505.945 km. Si sono quindi quantificati i benefici derivanti dalla catch up coordination su diversi orizzonti spaziali, indicati di seguito, gli autori hanno concluso che la maggior parte dei benefici derivano dal catch up di veicoli nelle vicinanze (entro 5 km).

TABLE I
RESULTS WITH CATCH-UP COORDINATION.

Coordination horizon	Fuel saved	Platooning rate	Catch ups made	Minutes saved
1 km	0.17%	4.66%	157	158
5 km	0.21%	6.59%	204	245
10 km	0.22%	6.94%	209	267
20 km	0.22%	6.97%	210	268

Figura 2.11: Risultati catch up coordination

Per il metodo departure coordination si sono fatti equivalere i 20 km a 15 minuti di oscillazione temporale della partenza (semplicemente utilizzando la velocità media ipotizzabile per la marcia in autostrada).

TABLE II
RESULTS WITH DEPARTURE COORDINATION.

Coordination horizon	Fuel saved	Platooning rate	Total adjusted departures	Avg minutes adjusted
1 km	0.11%	2.08%	105	2.6
5 km	0.27%	4.91%	319	5.5
10 km	0.42%	7.56%	434	7.2
20 km	0.60%	10.76%	529	11.3

Figura 2.12: Risultati departure coordination

In questo caso i benefici sono molto più alti rispetto al caso precedente, soprattutto perché non sono necessari regimi di marcia accelerati, per contro però il tempo necessario ai veicoli per arrivare a destinazione è maggiore.

I risultati del transport coordination scheme sono stati estrapolati in funzione di diversi intervalli temporali di ingresso nel ramo stradale per i quali è stata considerata possibile la formazione di un platoon.

TABLE III
RESULTS WITH TRANSPORT COORDINATION.

Time interval	Fuel saved*	Platooning rate
5 min	0.68%	13.22%
10 min	1.19%	22.41%
15 min	1.64%	30.26%
30 min	2.74%	47.58%
1 hr	4.31%	68.07%
2 hr	5.94%	83.23%
3 hr	6.87%	89.93%
6 hr	8.06%	95.67%
12 hr	8.85%	98.38%
24 hr	9.37%	99.38%

Figura 2.13: Risultati transport coordination scheme

In questo caso vale la pena far notare quanto emerge dalle simulazioni, se i veicoli affluenti allo stesso ramo stradale con un margine di 30 minuti possono formare un platoon, la maggior parte di questi è composta da 2-5 veicoli.

Poiché gli output sono stati ampiamente riportati, di seguito si riassumono gli input utilizzati nell'impostare le simulazioni.

INPUT

<i>Vmax platoon [km/h]</i>	85
<i>ΔV massima in un platoon [km/h]</i>	5
<i>Riduzione air drag in un platoon</i>	10%
<i>Area di studio [km²]</i>	500
<i>Parco veicoli considerato nella simulazione</i>	1773
<i>Distanza minima tra i veicoli per formare un platoon [m]</i>	100

Tabella 2-2: Fuel-Saving Potentials of Platooning evaluated through sparse heavy-duty vehicle position data

2.4.3 A Distributed Framework for Coordinated Heavy-Duty Vehicle Platooning (2015) – Larson J., Liang K., Johansson K. H., Fellow, IEEE

In questo articolo l'approccio al problema della coordinazione e formazione dei platoon è differente. Invece di affidare le operazioni di gestione e controllo ad un service provider, questa responsabilità è affidata ad una rete distribuita di controllers posizionati alle principali intersezioni, in grado di inviare ai veicoli in arrivo un valore di velocità da tenere per giungere nello stesso momento nell'intersezione successiva e, quindi, formare un platoon. Per validare questo tipo di impostazione, una simulazione è stata condotta sulla rete tedesca Autobahn considerando 7634 veicoli in un periodo di 24 ore.

Questo tipo di soluzione permette di ovviare al problema di reperimento dati, al momento infatti la posizione dei veicoli delle varie imprese non è registrata in maniera comune e disponibile, nella sua totalità, ad un platoon coordinator o service provider, si bypassano quindi i problemi legati alla disponibilità di tali imprese a collaborare tra loro. Inoltre la soluzione con i controllers non implica la risoluzione di un problema NP-hard e permette di coordinare la formazione dei platoon in tempo reale quando i camion si avvicinano all'intersezione, semplicemente modificandone la velocità. Le uniche informazioni che il veicolo deve trasmettere al controller (V2I) sono: posizione, velocità di marcia e destinazione.

Nella modellazione della rete si sono formulate delle ipotesi semplificative, ad esempio tutte le strade sono considerate in piano e due veicoli pesanti si considerano uniti in un platoon se si trovano entrambi in un vertice in un determinato istante e nel vertice successivo dopo lo stesso intervallo temporale. Anche in questo caso si è bypassato il problema della determinazione di un headway e si è ipotizzato un risparmio di carburante del 10% per i following vehicles, nessun risparmio per il leading vehicle. Per tener conto della scarsa disponibilità dei conducenti a cambiare il loro itinerario si sono considerati solo i casi in cui la formazione del platoon implicasse incrementi del tempo di viaggio trascurabili. Si è inoltre ignorata la possibilità che un veicolo abbandoni un platoon per unirsi ad un altro in seguito e non si sono considerati i casi di unione di due platoon tra

loro. Probabilmente la semplificazione più impattante è, nuovamente, l'aver ignorato le condizioni del traffico circostante, **in scenari coinvolgenti intersezioni, infatti, è prevedibile una maggior interazione con gli altri veicoli a guida tradizionale per cui manca ancora un insieme di modellazioni esaustive in letteratura.**

Si riporta di seguito un'immagine estrapolata dall'articolo che schematizza chiaramente il funzionamento dell'algorithm.

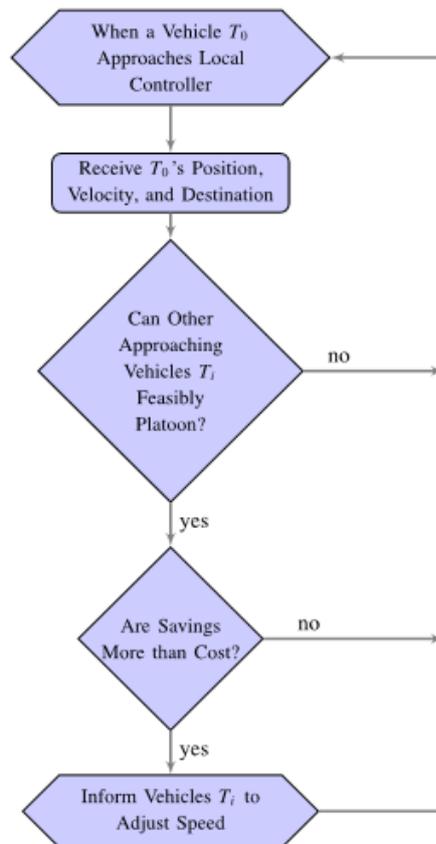


Figura 2.14: Algoritmo del controller

Nella pratica, le ipotesi assunte in congiunzione all'algorithm del controller fanno sì che il tempo di viaggio dei veicoli non aumenti nell'eseguire le istruzioni ricevute. Il controller con le informazioni ricevute dai veicoli calcola se convenga passare ad un regime di marcia accelerato (e, quindi, consumare momentaneamente più carburante) per poi formare il platoon o continuare autonomamente.

Nell'articolo è anche trattata una simulazione ripetuta 5000 volte sulla rete Autobahn tedesca con 300 camion distribuiti casualmente ogni volta. In media, anche per un numero così limitato di veicoli, il consumo di carburante si riduce del 2%. Aumentando il numero

di veicoli fino a 7000 si arriva ad ottenere, invece, un risparmio di circa il 9%, questo perché intuitivamente più veicoli possono formare platoon senza bisogno di modificare il loro percorso. Se si introduce un po' di flessibilità nei tempi di percorrenza e nelle deviazioni possibili, inoltre, il carburante consumato diminuisce ulteriormente. Il valore ottimale di deviazione è compreso tra i 10 ed i 20 km, questo perché se un veicolo si trova a dover percorrere 60 km in più per unirsi ad un platoon si vanificano tutti i risparmi derivanti dall'utilizzo della tecnologia. Anche con il valore ottimale, però, dalla simulazione emerge come i controller raramente dirottino i veicoli dal percorso più corto e che i risparmi derivino più dalla coordinazione e dall'ampliamento del parco veicolare considerato (per una deviazione di 10 km, con un risparmio di carburante del 10%, il platoon deve restare insieme più di 100 km perché risulti conveniente). L'impatto del margine temporale di cui può variare il tempo di percorrenza è, probabilmente, più rilevante se esistono diversi percorsi con una lunghezza più o meno simile, solo in questo caso permettere deviazioni può portare a risparmi considerevoli. **Non bisogna mai perdere di vista, infatti, quanto le simulazioni dipendano dall'infrastruttura considerata e dalle sue peculiarità. E' anche in virtù di ciò che è necessario questo tipo di studi vengano condotti in tutti i paesi europei lungo i principali corridoi dedicati al trasporto merci.**

Per verificare i risultati ottenuti, della totalità del parco veicolare si sono considerati solo veicoli che avrebbero dovuto percorrere più di 150 km (875 su 7634) la cui posizione è stata misurata tramite GPS ad intervalli di 5-10 minuti. Si è quindi definito un raggio entro il quale si considera possibile per due veicoli formare un platoon, questo approccio semplificato introduce evidentemente errori, come nel caso di due veicoli su due strade vicine o opportunità mancate, nella realtà, a causa della curvatura del tratto stradale. Al raggio si sono assegnati tre valori: 0,2 km, 1 km e 5 km. Il valore di 0,2 km è stato impostato per conto del platooning autonomo, il valore di 1 km tra due veicoli pesanti invece richiede solo un minimo sforzo di coordinazione per la formazione del platoon mentre il valore di 5 km è per tener conto dei casi più complessi (come i controllers oggetto dell'articolo) in grado di capitalizzare completamente sulle opportunità offerte dalla tecnologia.

	Veicoli coinvolti in un platoon	Risparmio di carburante
$R = 0,2 \text{ km}$	78 veicoli su 875	0,16%
$R = 1 \text{ km}$	241 veicoli su 875	0,38%
$R = 5 \text{ km}$	778 veicoli su 875	1,2%

Tabella 2-3: Potenzialità del truck platooning sulla rete tedesca Autobahn

Nelle conclusioni gli autori hanno espresso la necessità di validare i risultati della simulazione con dei test su strada e di considerare, nei lavori futuri, la possibilità che le condizioni di traffico dell'infrastruttura ostacolino la formazione dei platoon ed il catch up dei following vehicles (e di quantificarne, quindi, l'impatto sui risparmi di carburante). L'approccio dei controllers è una delle poche alternative valide ad un service provider che coordini il parco veicolare, sarebbe interessante in lavori futuri simularne gli impatti con un parco veicolare più ampio per definirne i limiti. Va inoltre fatto notare come questo tipo di soluzione possa essere implementata più rapidamente di quanto possa essere istituito un service provider (per il grado di incertezza che ancora ne caratterizza il business case), rappresenta quindi una potenziale soluzione in un orizzonte temporale ristretto per aumentare i benefici iniziali del truck platooning e non confinarlo ad un'implementazione monobrand nelle fasi iniziali.

	INPUT	OUTPUT
<i>Vmax platoon [km/h]</i>	80	
<i>Parco veicolare considerato</i>	7634	
<i>Riduzione air drag in un platoon</i>	10%	
<i>Percentuale di carburante risparmiato ottenibile dal modello</i>	300 veicoli	2%
<i>Percentuale di carburante risparmiato ottenibile dal modello</i>	7000 veicoli	9%

Tabella 2-4: A Distributed Framework for Coordinated Heavy-Duty Vehicle Platooning

2.4.4 Effect of Platooning on Fuel Consumption of Class 8 Vehicles Over a Range of Speeds, Following Distances and Mass (2014) -
Lammert , M.P., Duran , A., Diez , J., Burton , K., Nicholson , A.

In questo progetto di ricerca si è valutato il consumo di carburante di due autoarticolati Classe 8 combinati in un platoon. Si sono, infatti, condotti dieci track test durante i quali si sono fatti variare i valori di velocità, headway e pesi lordo dei veicoli, si sono utilizzati per il mantenimento della formazione i seguenti equipaggiamenti tecnologici: DSRC, V2V communications, interfaccia di controllo frenata e sterzata, videocamere ed HMI. Gli autori hanno evidenziato come i veicoli considerati siano modelli con un profilo aerodinamico migliorato, particolare rilevante di cui tenere conto durante l'interpretazione dei risultati. Nel progettare il test si è cercato di tener conto delle possibili variazioni di velocità imposte al platoon su strade pubbliche, per far ciò si è

imposto un profilo di velocità variabile lievemente più corto del circuito preparato in modo da tener conto di possibili errori dei conducenti nell'adeguarsi ai valori di velocità imposti (e per permettere ai veicoli di entrare ed uscire dal test sotto valori di velocità pari a circa 97 km/h in condizioni di cruise control). Si è inoltre imposta la disaggregazione del platoon in caso di cambio di marcia e frenata tramite il pedale del freno, ai veicoli in formazione infatti è stato permesso di rallentare solo tramite "engine braking" per variare la loro velocità ed attenersi al profilo stabilito. E' rilevante far notare come tale profilo fosse basato sul tempo e quindi variasse per ogni veicolo coinvolto nello stesso punto lungo il percorso. Il metodo utilizzato per i test è quello raccomandato in SAE J1321 Fuel Consumption Test Procedure – Type II (1986) con due adattamenti per poter essere applicato al truck platooning. La prima modifica ha riguardato i due veicoli in formazione i cui risultati sono stati confrontati indipendentemente con il veicolo di controllo che ha fornito i dati baseline e che è stato fatto viaggiare dietro al platoon 3 o 5 minuti dopo. Il secondo adattamento ha riguardato l'utilizzo di un'elettrovalvola che ha permesso al veicolo di passare da un serbatoio dedicato al warm-up ad un serbatoio quotato riservato al percorso tenuto durante il test. Si è infatti previsto un warm-up completo nel caso il veicolo fosse stato fermo per più di trenta minuti, tra un test e l'altro, però si è riservato un tempo di sosta minore (sufficiente a sostituire i serbatoi) per cui è stata definita anche una procedura di warm-up parziale. Ogni test è stato svolto secondo le seguenti fasi:

- Fine del warm-up, tutti i veicoli si sono trovati alla velocità ed alla distanza dagli altri desiderata
- Non appena ogni veicolo ha attraversato un punto prefissato a 12,87 chilometri dall'inizio del percorso, l'alimentazione è passata dal serbatoio principale a quello quotato. I rilevatori hanno iniziato a registrare i dati desiderati.
- I veicoli hanno percorso sette giri del circuito per un totale di 95 chilometri, una volta passato, durante il giro finale, il chilometro 12,87, ogni conducente ha riattivato l'elettrovalvola e sostituito nuovamente i serbatoi.

Completato il test i risultati sono stati registrati e confrontati sulla base del T/C ratio, cioè il rapporto tra il carburante consumato dal veicolo in formazione e quello consumato dal veicolo baseline. Si è inoltre considerato anche il ratio dato dalla somma del carburante impiegato dai due veicoli nel platoon, diviso la quantità impiegata dal veicolo baseline, questo è stato fatto per evitare di inficiare i valori misurati con una media tra i due veicoli.

Sono state scartate le misure che variavano, tra i vari test effettuati, più del 2,5 % con la sola eccezione delle misure a velocità variabile in cui oscillazioni maggiori sono state causate probabilmente da lievi errori dei conducenti nell'adeguarsi al profilo di velocità comunicato. Durante i test effettuati si sono registrate misurazioni anche per quanto riguarda le caratteristiche ambientali quali la temperatura, l'umidità relativa, la pressione barometrica, la velocità media del vento, il picco di tale velocità e la direzione del vento. Tutti questi valori infatti influiscono sul consumo di carburante ed i risparmi derivanti dal truck platooning per i quali è fondamentale identificarne la dipendenza.

Si riporta di seguito la tabella con i risultati dei test oggetto di questo progetto.

Test Conditions	Percent Fuel Saved (Gravimetric)					
	Lead Truck		Trailing Truck		"Team"	
	Nominal	95% CI	Nominal	95% CI	Nominal	95% CI
55 mph, 65k, 30 ft	4.33%	0.70%	8.38%	1.03%	6.38%	0.28%
55 mph, 65k, 50 ft	2.22%	0.49%	9.72%	2.24%	6.01%	1.33%
65 mph, 65k, 20 ft	5.28%	0.34%	2.81%	0.71%	4.04%	0.52%
65 mph, 65k, 30 ft	4.06%	1.19%	7.53%	1.33%	5.80%	1.26%
65 mph, 65k, 40 ft	2.69%	0.99%	9.10%	0.71%	5.91%	0.84%
65 mph, 65k, 50 ft	3.14%	2.65%	9.17%	2.11%	6.15%	2.37%
65 mph, 65k, 75 ft	1.69%	2.35%	9.39%	1.93%	5.53%	2.12%
70 mph, 65k, 30 ft	4.42%	1.92%	4.62%	2.33%	4.52%	2.12%
70 mph, 65k, 50 ft	2.23%	0.35%	8.36%	1.44%	5.31%	0.90%
VAR, 65k, 50 ft	2.70%	8.32%	4.22%	6.82%	3.45%	7.56%
65 mph, 80k, 50 ft	0.55%	3.58%	6.67%	4.84%	3.68%	2.07%

Tabella 2-5: : Effect of Platooning on Fuel Consumption of Class 8 Vehicles Over a Range of Speeds, Following Distances and Mass

Condizioni del test ⁴	Percentuale di carburante risparmiato (Gravimetrico)					
	Leading vehicle		Following vehicle		Platoon	
	Nominale	95% intervallo di confidenza	Nominale	95% intervallo di confidenza	Nominale	95% intervallo di confidenza
88 km/h, 29.5 t, 9,1 m	4,33%	0,7%	8,38%	1,03%	6,38%	0,28%
88 km/h, 29.5 t, 15 m	2,22%	0,49%	9,72%	2,24%	6,01%	1,33%
104.6 km/h, 29,5 t, 6.1 m	5,28%	0,34%	2,81%	0,71%	4,04%	0,52%
104.6 km/h, 29,5 t, 9.1 m	4,06%	1,19%	7,53%	1,33%	5,8%	1,26%
104.6 km/h, 29,5 t, 12.1 m	2,69%	0,99%	9,1%	0,71%	5,91%	0,84%
104.6 km/h, 29,5 t, 15.2 m	3,14%	2,65%	9,17%	2,11%	6,15%	2,37%
104.6 km/h, 29,5 t, 22.9 m	1,69%	2,35%	9,39%	1,93%	5,53%	2,12%
112.7 km/h, 29.5 t, 9.1 m	4,42%	1,92%	4,62%	2,33%	4,52%	2,12%
112.7 km/h, 29.5 t, 15.2 m	2,23%	0,35%	8,36%	1,44%	5,31%	0,9%
VAR., 29.5 t, 15.2 m	2,7%	8,32%	4,22%	6,82%	3,45%	7,56%

⁴ Valori numerici approssimati nella conversione

104.6 km/h, 36.3 t, 15.2 m	0,55%	3,58%	6,67%	4,84%	3,68%	2,07%
-------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tabella 2-6: Output convertiti secondo le unità di misura dell'SI

I valori riportati in blu sono quelli che non hanno significato, statisticamente parlando, se confrontati con il caso baseline di riferimento. E' importante far notare che gli headway spaziali mantenuti corrispondono a gap temporali che vanno dai 0,2 s ai 0,8 s.

Una delle considerazioni fondamentali è come la temperatura del liquido refrigerante aumenti al diminuire dell'headway, questo comporta un maggiore utilizzo della ventola sulla parte frontale del following vehicle che interferisce con i risparmi aerodinamici, è necessario che queste interazioni vengano approfondite per delineare un valore ottimale dell'headway mantenuto. Emerge inoltre, dall'analisi dei risultati, come velocità maggiori del vento in generale aumentino i risparmi legati al truck platooning per il leading vehicle mentre temperature più basse riducano questi valori. I valori massimi di riduzione dei consumi sono stati di 5,3% per il Leading Vehicle e di 9,7% per il Following Vehicle, gli autori hanno evidenziato però come tali valori non si siano ottenuti durante lo stesso test, le condizioni ambientali sono variate molto durante le tre settimane in cui si sono effettuate le misurazioni, la velocità media del vento è variata tra i 3,2 ed i 18,8 km/h, le temperature media hanno oscillato tra i 13 ed i 32 °C mentre le percentuali di umidità relativa sono andate dal 17 all'88%.

Nelle conclusioni gli autori hanno indicato quali sono gli aspetti da approfondire, ad iniziare dalla necessità di determinare l'headway minimo oltre il quale i benefici aerodinamici per il following vehicle iniziano a diminuire. Approfondire la possibilità di progettare un sistema di raffreddamento del motore dedicato al truck platooning che non interferisca con i benefici aerodinamici del truck platooning sembra anche particolarmente rilevante così come lo è la necessità di effettuare un numero maggiore di field test in modo da poter disporre di un ampio set di dati riguardanti numero di veicoli, velocità ed headway variabili.

2.4.5 Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis (2016) –
Deng Q.

Lo scopo che l'autore si è prefisso, in questo lavoro di tesi, è la modellazione del truck platooning e la simulazione delle manovre più frequenti. Il trattato comprende molte tematiche e verrà citato altre volte nelle pagine seguenti, in questo paragrafo si riporta il modello utilizzato per stimare il consumo di carburante⁵ ed i parametri assunti.

$$f = \frac{\int_{t_0}^{t_f} \delta[\mu \cos\vartheta + \sin\vartheta)M_{gv} + kv^3 + M_{av}]dt}{H\eta}$$

H ed η rappresentano rispettivamente la densità energetica e l'efficienza, v ed a sono la velocità e l'accelerazione del veicolo, M ne è la massa e δ indica se il motore è attivo oppure spento (assumendo valore unitario o nullo).

Il coefficiente k, rappresentante la resistenza aerodinamica, viene ricavato dalla formula $k = \frac{1}{2}\rho_a A_a c_D (1 - \varphi)$. Per i leading vehicle φ è nullo mentre, per i following vehicles si prendono a riferimento i valori riportati da Wolf-Heinrich ed Ahmed in "Aerodynamics of Road Vehicles (1998).

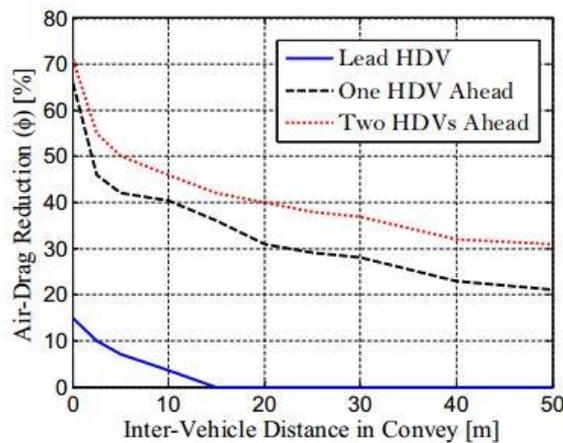


Figure 3.2: percentage of air-drag reduction in a three-HDV platoon from various inter-vehicle distance: short inter-vehicle distance results in great air-drag reduction (Wolf-Heinrich and Ahmed, 1998).

Figura 2.15: Air drag in funzione dell'headway - Wolf-Heinrich ed Ahmed 1998

⁵ Modello proposto da Oguchi et al. (2002)

L'unico parametro che viene completamente ignorato, in questo caso, è l'inclinazione del ramo stradale. Per modellizzare l'impatto del platoon sul traffico si è utilizzato il software VISSIM, in cui si sono inserite anche le caratteristiche del CACC per determinare l'headway tenuto dai veicoli nelle varie situazioni, in funzione del quale è possibile ricavare l'air drag e, quindi, i consumi di carburante. I paragrafi dedicati alla modellizzazione verranno ripresi in seguito nel corso di questa tesi. Le microsimulazioni svolte hanno previsto una penetrazione nel mercato dei veicoli pesanti equipaggiati per il platooning del 10% ed una velocità di 90 km/h, la riduzione dell'air drag è stata imposta di 6% facendo riferimento a Sahlholm (2011), il numero massimo di veicoli in un platoon è di tre. Non sono stati però quantificati i risparmi per i veicoli pesanti legati al carburante in funzione dell'headway tenuto e delle condizioni di traffico, si è però concluso che una maggiore percentuale di veicoli pesanti in platoon aumenti l'efficienza energetica degli altri veicoli, banalmente, nelle simulazioni condotte le macchine o i camion viaggianti singolarmente hanno percorso un maggior numero di chilometri a parità di carburante consumato. L'autore ipotizza che questo sia l'effetto di un minor numero di cambi di corsia, dovuto alla possibilità di superare più veicoli pesanti in una singola manovra, e quindi di una riduzione delle accelerazioni e decelerazioni del veicolo.

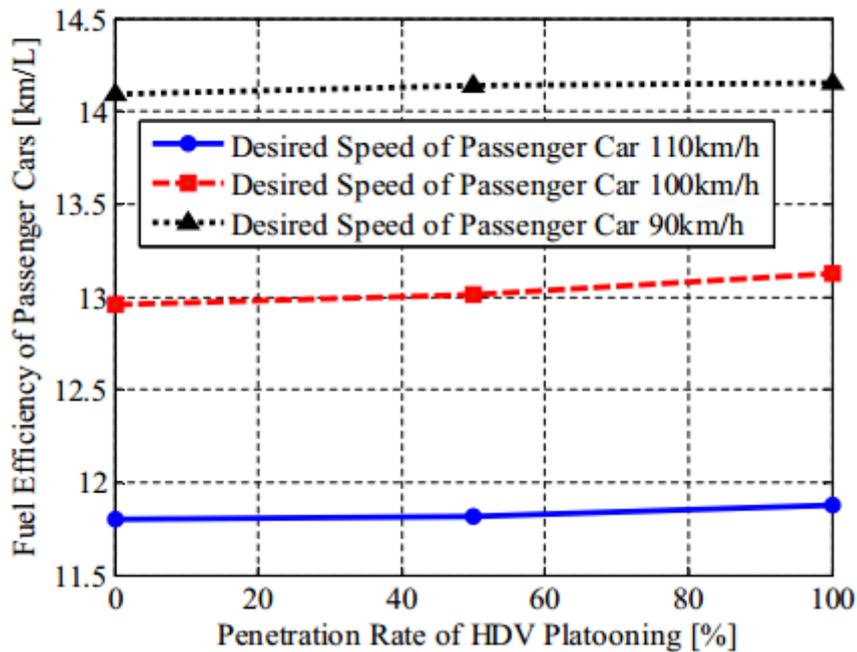


Figura 2.16: Minori consumi per gli altri veicoli

Non vengono auspiccate future ricerche per quanto riguarda la quantificazione dei consumi e delle emissioni.

INPUT

<i>Penetrazione nel mercato di veicoli dotati di CACC</i>	10%
<i>V_{max} platoon [km/h]</i>	90
<i>Riduzione air drag in un platoon</i>	6%
<i>Numero massimo di veicoli in un platoon</i>	3

Tabella 2-7: Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis

2.4.6 Networked control challenges in collaborative road freight transport (2016) – Liang K., van de Hoef S., Terelius H., Turri V., Besselink B., Mårtensson J., Johansson H. K.

In questo articolo gli autori hanno ipotizzato un approccio di coordinamento veicoli pesanti centralizzato, ancora una volta nelle mani di un service provider, esplicitando l'influenza delle condizioni di traffico sul ramo stradale al momento della formazione del platoon. Nel modello trattato nell'articolo tutti gli itinerari del parco veicolare considerato devono essere identificati e confrontati tra loro per evidenziare quelli con tratti in comune e tempistiche compatibili (si è considerato un intervallo di 15 minuti) alla formazione del platoon. Ogni itinerario è stato caratterizzato da un tragitto spaziale e da diversi intervalli temporali che hanno identificato diverse sezioni dell'infrastruttura. Il tragitto definito è stato diviso in archi al cui inizio sono associate delle coordinate geografiche e due vincoli temporali che identificano l'intervallo temporale in cui il veicolo può transitare senza ritardare il suo arrivo a destinazione. Con questi parametri è possibile definire quali coppie di veicoli possono collaborare e formare un platoon (si è adottato l'approccio basato sulle "features" esposto nelle pagine precedenti). Una volta definito il modello lo si è applicato in una simulazione sulla rete stradale compresa tra le 14 città più grandi della Germania, si è utilizzata una matrice O-D risultato di un'ottimizzazione volta a minimizzare il numero di viaggi a vuoto per i veicoli pesanti. Il numero di viaggi considerati è di 5000 in un giorno, la simulazione è stata ripetuta su un orizzonte temporale di 100 giorni e con una velocità di marcia di 80 km/h. Dai risultati ottenuti gli autori hanno estrapolato alcune considerazioni: il numero di platoon componibili aumenta quasi linearmente con il numero di viaggi considerati e gli archi su cui ciò risulta possibile sono circa l'80% dell'intera rete (questo perché i tratti in comune si concentrano sulle strade principali, quasi nessuna opportunità di platoon, invece, emerge su strade rurali nei tratti iniziali e finali degli itinerari). Aumentare l'intervallo temporale rispetto ai 15 minuti di riferimento, evidentemente, aumenta il numero di platoon componibili, è sufficiente un aumento di 20 secondi per avere lo stesso effetto che si avrebbe con 1000 itinerari aggiuntivi al giorno sulla rete stradale.

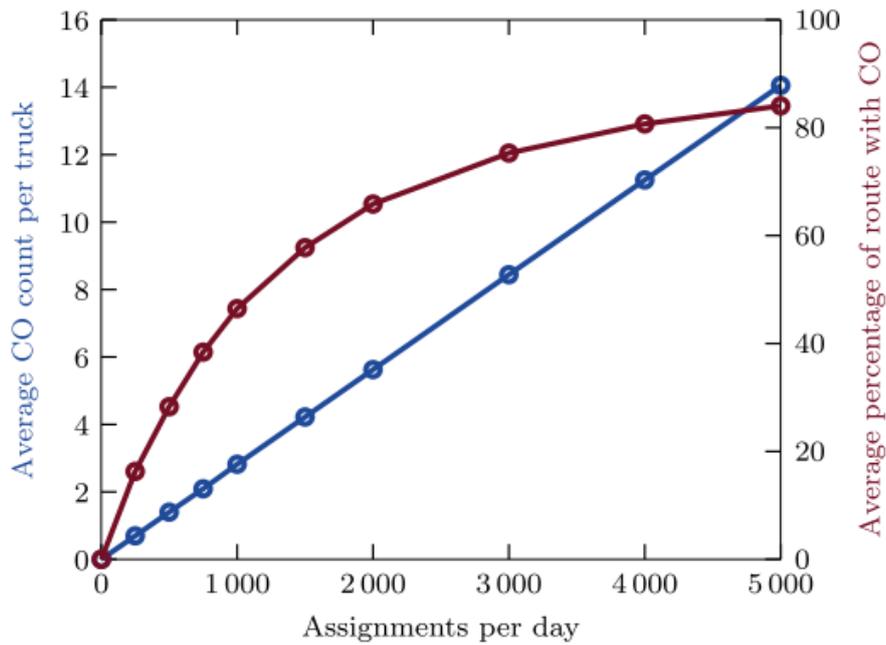


Fig. 9. The plot shows how the average number of collaboration opportunities (CO) and the average percentage of the route with collaboration opportunities change with the number of assignments per day using an adaptation interval of 15 min.

Figura 2.17: Networked control challenges in collaborative road freight transport

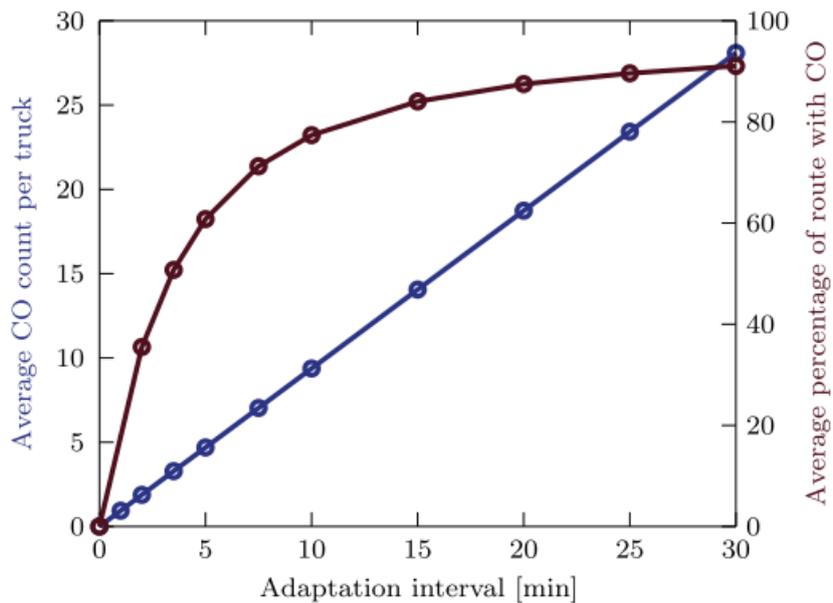


Fig. 10. The plot shows how the average number of collaboration opportunities (CO) and the average percentage of the route with collaboration opportunities change with the timing flexibility of the trucks with 5000 assignments per day.

Figura 2.18: Networked control challenges in collaborative road freight transport

Una volta ricavate tutte le coppie di veicoli in grado di formare un platoon si è confrontato il consumo di carburante nei casi di marcia in platoon e di marcia indipendente. Come istante di inizio di questo confronto si è scelto quello in cui per la prima volta entrambi i veicoli sono risultati essere sul segmento in comune ed il costo del carburante utilizzato è stato quantificato secondo la seguente formula:

$$J = v_1^2(s_m - s_s)\varphi_1 + v_2^2 s_m \varphi_2 + v_p^2(s_f - s_m)\varphi_p$$

Dove s_s è la distanza iniziale tra i due veicoli una volta giunti sul ramo in comune, s_m è il punto in cui si forma il platoon, s_f è il punto in cui il platoon si disfa, $v_{1,2}$ sono le velocità dei due veicoli prima di s_m ed $\varphi_{1,2}$ sono i coefficienti di resistenza aerodinamica per i due veicoli. v_p è la velocità mantenuta dal platoon, φ_p è il coefficiente aerodinamico ridotto. Con questi parametri così definiti è intuibile ricavare

$$s_m = s_s \frac{v_2}{v_2 - v_1}$$

A questo punto, tenendo presenti i vincoli sul punto di formazione e sulle velocità (non oltre i limiti legali ma comunque in grado di garantire i tempi di arrivo a destinazione), è possibile risolvere il problema di ottimizzazione che minimizzi il consumo di carburante totale. Quanto visto si discosta poco dai lavori analizzati precedentemente, questo articolo però approfondisce la tematica dell'interazione con il traffico durante la manovra di formazione del platoon e lo fa simulandola con il software VISSIM. La simulazione condotta ha considerato una strada lunga 50 km a doppia corsia, il flusso massimo considerato è di 2200 veh/h/lane che corrisponde ad una densità di traffico di 21 veh/km/lane. In caso di flusso libero il diagramma fondamentale fa corrispondere una velocità media di 105 km/h, quando la congestione diventa rilevante (oltre i 18 veh/km/lane) la velocità media cala ed i benefici del platooning diventano sempre minori. Nella simulazione si sono considerati tre livelli di densità di traffico (11, 15 e 19 veh/km/lane), lo scenario ha previsto che entrambi i veicoli pesanti guidassero sulla corsia di destra, distanziati di 3 km tra loro. Per il leading vehicle si è fissata la velocità di 80 km/h, il following vehicle nello scenario ha tenuto i 90 km/h per raggiungerlo. Il platoon si è considerato formato una volta raggiunto un intervallo spaziale inferiore a 30 m tra i due camion, senza alcun veicolo frapposto. Per ognuno dei tre livelli di densità del traffico la simulazione è stata condotta 30 volte e si sono ottenuti i seguenti risultati.

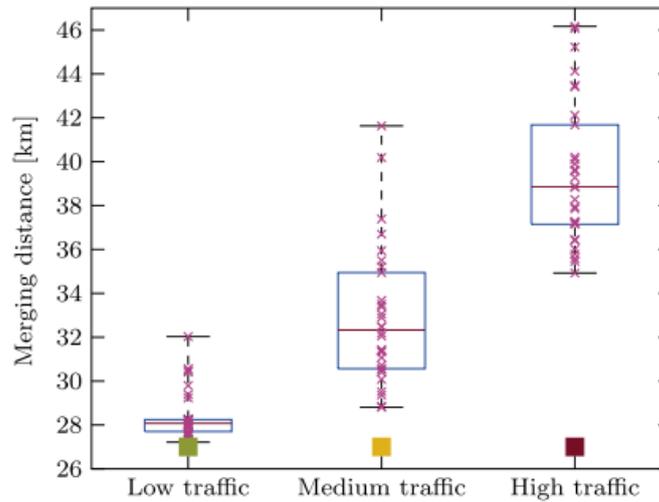


Fig. 14. Box plot of the merge points for low, medium, and high traffic where the lead truck drives at 80 km/h and trailing truck at 90 km/h. The whiskers indicate the minimum and the maximum value, the blue box indicates the 25 and 75 percentile, and the red line indicates the median. Each individual simulation result is plotted with purple "x". The nominal merge points are depicted with a green, yellow, and red square for low, medium, and high traffic, respectively. (For interpretation of the references to color in this figure caption, the reader is referred to the web version of this paper.)

Figura 2.19: Risultato delle simulazioni

Il punto di formazione ottimale è detto “merge point”, ottenibile solo in assenza di traffico. Per i tre livelli di densità di traffico considerati, però, la distanza percorsa a partire da s_m risulta incrementata del 4%, 20% e 45%. Gli autori nell’articolo imputano questi ritardi al traffico che si accoda al leading vehicle che procede ad 80 km/h e costituisce un collo di bottiglia in movimento. Maggiore risulta essere il livello di congestione, più in fretta si forma la coda dietro al leading vehicle, maggiore è il ritardo nella formazione del platoon. Una volta che questo si è formato, l’articolo confronta due tipi di controllo dell’headway: **constant spacing policy e delay-based spacing policy**. Nel primo dei due approcci l’obiettivo è mantenere una distanza fissata tra i due veicoli formanti il platoon, questa soluzione però non permette di attenuare i disturbi che si propagano lungo il platoon (attenuazione detta anche “string stability”). Per ottenere questa proprietà nel platoon è necessario rilassare il tipo di controllo dell’headway nel modo seguente:

$$s_{ref,i}(t) = s_{i-1}(t) - (d + hv_i(t))$$

$s_{ref,i}$ è la posizione desiderata del following vehicle, v_i è la velocità del following vehicle ed h è lo spaziamento temporale che si vuole ottenere tra lui ed il leading vehicle. In

questo modo si sfrutta l'essere asintoticamente stabile dell'errore nella spaziatura. Il secondo approccio possibile è il delay-based spacing policy in cui si impone:

$$s_{ref,i}(t) = s_{i-1}(t - \Delta t)$$

Così facendo si impone che la traiettoria del following vehicle sia uguale a quella del leading vehicle, ritardata di un certo intervallo temporale. **Con questo approccio si ottiene che tutti i veicoli abbiano lo stesso profilo di velocità nello spazio, proprietà fondamentale per platoon molto lunghi perché assicura che la velocità tenuta dal veicolo pesante sia quella ottimale in base alle proprietà del tratto stradale quali curve e pendenze.** Anche in questo caso la string stability può essere assicurata facendo la stessa assunzione della constant spacing policy. A questo punto l'articolo ha caratterizzato tutti gli aspetti necessari per comprendere l'esperimento condotto su un'autostrada pubblica tra Hallunda e Moraberg (a sud-ovest di Stoccolma). L'esperimento è stato condotto per quattro settimane su un ramo a tre corsie lungo 11 km, ogni volta si è cercato di unire due veicoli pesanti in un platoon al variare delle condizioni di traffico, entrambi i veicoli sono stati dotati di radar, videocamera e GPS. Il following vehicle è stato ogni volta fatto partire circa un minuto dopo il leading vehicle, ed ha tenuto una velocità di 90 km/h a fronte degli 80 km/h del veicolo da raggiungere. La densità del traffico è stata misurata grazie a 78 postazioni radar doppler posizionate a 200-400 metri l'una dall'altra, grazie a questi dati è stato possibile ricavare il diagramma fondamentale dell'arco stradale in esame. Su 186 test in totale, 141 hanno portato alla formazione del platoon senza difficoltà, cioè la distanza relativa dei punti GPS è risultata inferiore agli 80 m, il radar ha misurato la stessa distanza relativa dal veicolo di fronte e la videocamera ha classificato tale veicolo in quanto camion. I 45 tentativi falliti sono stati causati dalla congestione del traffico, da una distanza iniziale troppo grande rispetto alla lunghezza del ramo stradale o da veicoli persistentemente accodati al leading vehicle. Questi risultati sperimentali hanno confermato l'influenza della densità di traffico sulla manovra di formazione del platoon ottenuta nelle simulazioni, al termine dell'articolo gli autori ritengono plausibile la formulazione di un metodo di predizione del ritardo del merging point, a patto di avere accesso alle misure della densità del traffico sulla rete. Nelle conclusioni gli autori auspicano test sperimentali con un numero maggiore di veicoli e lo sviluppo di un business model in cui i benefici legati all'utilizzo della coordinazione di

un service provider vengano equamente ripartiti. Nella tabella seguente si riassumono input ed output utilizzati nelle simulazioni e nel test sperimentale descritti.

	INPUT	OUTPUT
<i>Vmax platoon [km/h]</i>	80	
<i>Vmax following vehicle [km/h]</i>	90	
<i>Numero di viaggi al giorno</i>	5000	
<i>Numero di veicoli in un Platoon</i>	2	
<i>Intervallo temporale tra due veicoli potenzialmente combinabili [min]</i>	15	
<i>Porzione della rete su cui si formano platoon</i>		≈80%
<i>Lunghezza ramo stradale considerato nelle simulazioni [km]</i>	50	
<i>Gap spaziale nelle simulazioni sotto il quale due veicoli si considerano in un platoon [m]</i>	30	
<i>Distanza iniziale dei due veicoli nelle simulazioni [km]</i>	3	
<i>Densità di traffico considerate nelle simulazioni</i>	Bassa, media ed alta	
<i>Incremento dello spazio necessario alla formazione del platoon</i>		4% - 20% - 45%

<i>Lunghezza ramo stradale considerato nei test su strada [km]</i>	11	
<i>Intervallo temporale tra le partenze dei due veicoli [min]</i>	1	
<i>Gap spaziale nei test sotto il quale due veicoli si considerano in un platoon [m]</i>	80 m	
<i>Peso del leading vehicle [tonnes]</i>	37,5	
<i>Peso del following vehicle [tonnes]</i>	15	
<i>Numero di test su strada</i>	186	
<i>Numero di test in cui il merging è riuscito</i>		141

Tabella 2-8: *Networked control challenges in collaborative road freight transport (2016) – Liang K., van de Hoef S., Terelius H., Turri V., Besselink B., Mårtensson J., Johansson H. K.*

2.4.7 Parametri assunti in altri lavori

Oltre ai lavori sopra citati, sono molti gli spunti riscontrabili nei casi di studio, nei final – report, nelle sperimentazioni condotte a livello locale e nei contributi ai vari convegni tenuti sull’argomento.

E’ recente, ad esempio, lo studio esplorativo condotto per il programma *Drive Sweden: Study of communication needs in interaction between trucks and surrounding traffic in platooning* di Andersson et al. [7] in cui gli autori cercano di identificare il consumo di carburante in più dovuto a fenomeni di cut-in nel platoon. Per cut-in si intende la manovra di un veicolo esterno al platoon che si inserisce tra due dei veicoli in formazione, costringendoli a ripristinare un headway tradizionale tra loro ed il veicolo estraneo e conducendo, quindi, all’inevitabile disgregazione del platoon. Evidentemente l’incremento di carburante è conseguente al minor tempo in cui i veicoli possono

viaggiare in formazione, il platoon infatti può essere riformato solo quando i veicoli esterni cambiano corsia, sulla base dei dati ricavati dall'European Truck Platooning Challenge gli autori hanno considerato di 15 secondi l'intervallo medio in cui un autoveicolo resta tra due veicoli pesanti. Il numero di cut-in risulta funzione non solo dell'headway tenuto e della velocità di marcia del platoon (che, se bassa, può spingere altri veicoli a manovre di sorpasso azzardate, interrotte prima di aver superato tutti i camion in formazione), ma anche di **differenze culturali** che influenzano il metodo di guida individuale e l'aggressività con cui vengono condotte le manovre di sorpasso. Sempre gli autori dello studio riportano come dati di studi naturalistici negli USA indichino assenza di cut-ins per headway minori di 30 metri, in Europa invece, durante l'European Truck Platooning Challenge (nei tratti con un headway di 1 secondo corrispondente a 22 m), i risultati hanno riportato un cut-in ogni 15 km. Le differenze di comportamento, però, sembrano riscontrabili anche a livello più circoscritto, in Svezia ad esempio il fenomeno del cut-in è molto raro mentre su reti come quella tedesca o Olandesi è un fenomeno più diffuso anche a causa di una maggior densità di traffico. Il modello utilizzato dagli autori per quantificare l'aumento dei consumi di carburante dovuti al cut-in è stato sviluppato da Voronov A., Andersson J. E Englund C. ed è impostato come segue. Il consumo di carburante è proporzionale all'energia estratta dal carburante, quindi, $m_{fuel} = \frac{E_{fuel}}{c_p^{diesel}}$ con E_{fuel} pari all'energia totale contenuta nel carburante e c_p^{diesel} la densità dell'energia specifica contenuta nel diesel. Considerando che circa il 65% di quest'energia viene dissipata, la parte restante deve essere sufficiente a superare la gravità sui tratti in pendenza, le resistenze al rotolamento e quella aerodinamica. Questo vuol dire che $m\dot{v} = F_{wheel} - F_{air} - F_{roll} - F_g$, con m la massa equivalente del veicolo, v la velocità longitudinale, F_{wheel} la forza totale trasmessa dalle ruote, F_{roll} la resistenza al rotolamento, $F_{air} = \frac{1}{2}\rho_a c_d A_f v^2$, ed F_g la resistenza gravitazionale. Se si pone che $F_{fuel} = \frac{dE_{fuel}}{dx} = \frac{F_{eng}}{\eta}$, con η pari al rendimento del motore, si può scrivere l'equazione della dinamica del veicolo e ricavare m_{fuel} .

$$\frac{dE}{dx} = F_{eng} - F_{brk} - b_{air} * E - F_{roll} - F_g$$

Con F_{brk} pari alla forza di frenatura e $b_{air} = \frac{\rho_a c_d A_f}{m}$. Segue che:

$$m_{fuel} = \frac{1}{c_p^{diesel}} \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\eta(x)} F_{eng}(x) dx = \frac{1}{c_p^{diesel}} \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\eta} \left(\frac{dE}{dx} + F_{brk} + F_{air} + F_{roll} + F_g \right) v dt$$

Una volta definito il generico modello di consumo di carburante, gli autori hanno cercato di quantificare l'impatto dei cut-in, facendo le seguenti assunzioni:

- Un cut-in vanifica tutti i benefici aerodinamici derivanti dal platooning
- Con un headway di 10 m la riduzione di resistenze aerodinamiche è del 40% ($\gamma_{platoon}$)
- La resistenza aerodinamica incide per 1/3 (γ_{air}) sul totale del consumo di carburante per un veicolo da 40 t, ciò implica un risparmio di carburante di circa il 13%
- Per un profilo topografico ordinario (dal punto di vista svedese) il consumo è di 30L/100 km in caso di guida tradizionale

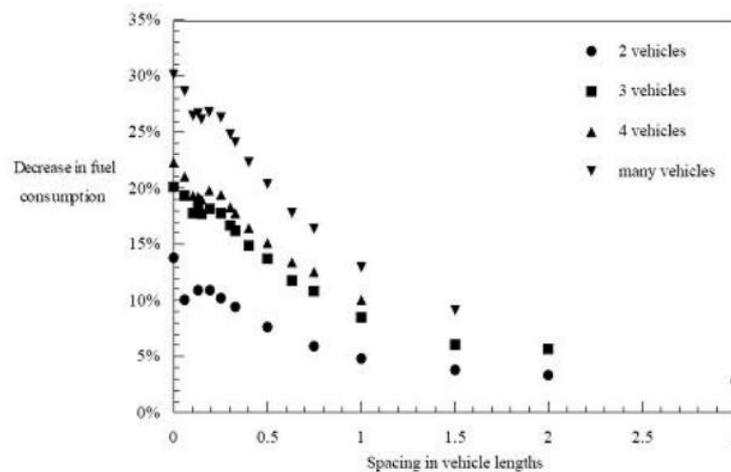
Con queste ipotesi si può affermare che il risparmio di carburante ottenuto viaggiando in un platoon è di 4L/100 km (10-15%). Per un cut-in di 45 secondi (corrispondente ad 1 km per una $v = 80$ km/h) gli autori ne hanno calcolato il conseguente aumento dei consumi con la seguente formula:

$$m_{lost} = \gamma_{platoon} * \gamma_{air} * m_{fuel} * \frac{n_{cut} * d_{cut}}{100km}$$

Con n_{cut} pari al numero di cut-ins in 100 km e d_{cut} alla distanza media su cui dura un cut-in. Poiché il lavoro in oggetto è stato impostato come uno studio preliminare, molti dei parametri utilizzati sono frutto di assunzioni e devono essere validati da dati derivanti da simulazioni o test su strada, le grandezze definite sono state frutto di interviste con le seguenti parti in causa:

- Guidatori di camion svedesi, dell'IVECO, di Scania, di Volvo Trucks e della DAF
- Guidatori esperti di automobili
- Guidatori di camion che hanno partecipato all'European Truck Platooning Challenge
- IVECO e DAF
- Chief executive of Peloton - Richard Bishop

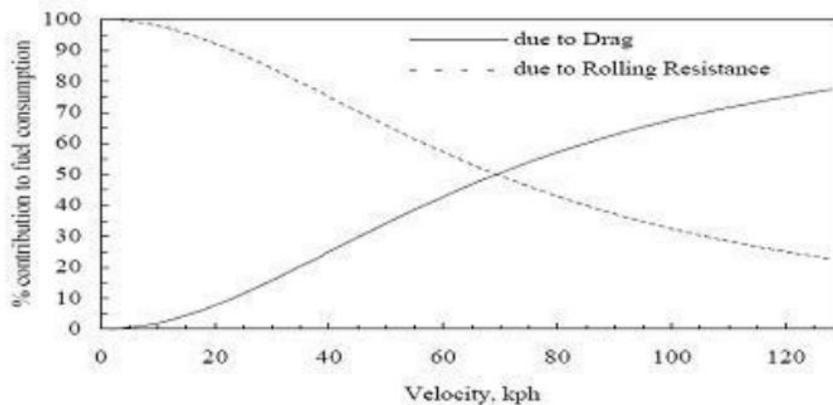
Un altro documento in grado di contribuire ad identificare la situazione attuale dal punto di vista delle emissioni e del consumo di carburante è “Truck platooning – driving the future of transportation” redatto per la TNO da Janssen R., Zwijnenberg H., Blankers I. e de Kruijff J. In questo studio è stato analizzato il caso di truck platoons costituiti da due veicoli, considerando un gap temporale in grado di scendere fino a 0,3 secondi. Come riduzione della resistenza aerodinamica per i following vehicles si è considerato un range di valori del 8-13%, per il leading vehicle un range del 2-8%. Con un consumo di 0,25 L per chilometro si è ottenuto un risparmio di carburante del 10% mediato su entrambi i veicoli formanti il platoon. Sempre per quanto riguarda questi parametri, fondamentali per la quantificazione dei benefici economici derivanti dal truck platooning nelle varie configurazioni, è opportuno far riferimento al documento SARTRE di Arturo Dàvila e Mario Nombela per la IDIADA Automotive Technology (in questo documento, infatti, si riportano i risultati del PATH project⁶ sull’aerodinamica del veicolo nel platoon).



All geometries average decrease in fuel consumption for platooning vehicles
Source: PATH Project

Figura 2.20: Decrease in fuel consumption - Spacing

⁶ The Aerodynamic Performance of Platoons – A Final Report [72]



Fuel consumption due to drag and to rolling resistance as a percentage of total fuel consumption
Source: PATH Project

Figura 2.21: Consumo di carburante - Velocità

Vale la pena far notare che, nell'immagine 2.17, un headway di 0,2 vehicle lengths è pari ad 1 metro e che il documento è stato redatto analizzando il platooning indipendentemente dal tipo di veicolo (e, quindi, senza tener conto delle peculiarità del truck platooning).

Nello studio *Automated Truck Platoon Control and Field Test, Road Vehicle Automation* di Lu X. e Shladover S. E., i risultati di un test effettuato su un platoon composto da tre veicoli pesanti hanno riportato un risparmio di carburante del 4,3% per il primo veicolo, 10% per il secondo e 14% per il terzo (il tutto con un headway di 6m)

Poiché dal risparmio di carburante derivano gli incentivi maggiori ad investire da parte delle imprese di trasporto, è fondamentale lo sviluppo di un business case chiaro e preciso e di un service provider in grado di coordinare tutto il parco veicoli pesanti. Non è ancora chiaro, ad esempio, in che modo ripartire i benefici derivanti dal truck platooning tra le varie aziende che acconsentono di partecipare alla coordinazione effettuata dal service provider, i leading vehicles sono quelli che guadagnano di meno dalla formazione del platooning, facendo risparmiare molto più carburante ad i following vehicles, magari appartenenti ad un'impresa concorrente. E' necessario, inoltre, verificare la disponibilità delle singole imprese a condividere alcune informazioni con una figura esterna, disponibilità che può essere incentivata con una chiara quantificazione dei benefici caso per caso.

L'unico parametro che si può ritenere abbastanza consolidato e comune ai vari lavori di ricerca è la V_{max} del platoon, pari ad 80 km/h. Le ipotesi più impattanti riscontrate nei vari studi sono le seguenti:

- Riduzione delle resistenze aerodinamiche dei following vehicles uniforme lungo tutto il platoon, pari circa al 10%
- Nessuna riduzione delle resistenze aerodinamiche per il leading vehicle
- Nessun impatto delle caratteristiche geometriche dell'infrastruttura o delle diverse caratteristiche meccaniche dei veicoli
- Nessuna dipendenza dei risparmi dalla congestione

Inoltre è da approfondire l'impatto che la congestione può avere sulla coordinazione del parco veicolare dedicato al truck platooning ed i conseguenti incrementi di emissioni. Si riporta di seguito uno schema riassuntivo di tutte le grandezze in gioco e dei rapporti di interdipendenza emersi.

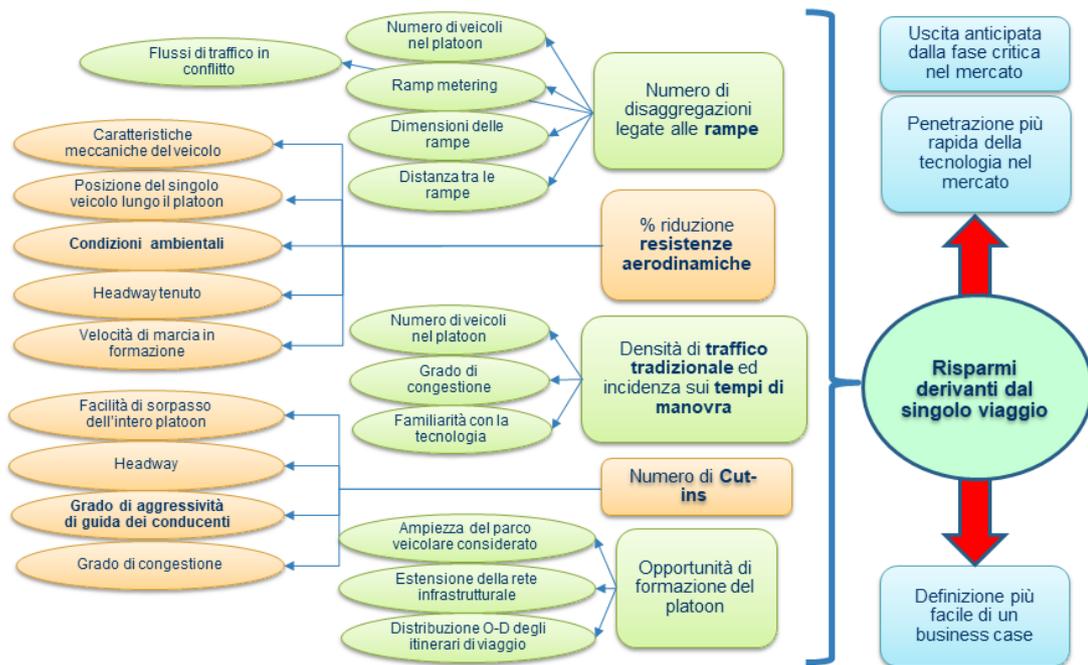


Figura 2.22: Risparmi di carburante-schema riassuntivo

Per quanto riguarda la tematica del service provider, invece, si richiama il progetto Ursa Major [88] che promuove lo scambio di informazioni tra i vari gestori nazionali coinvolti nel trasporto lungo la rete TEN-T. Si sta lavorando, quindi, perché molte delle

informazioni che è auspicabile raggiungano il PSP vengano comunicate tramite V2I in formato DATEX II, comprensibile dai vari operatori stradali e service provider dedicati a livello europeo.

2.5 Infrastruttura e truck platooning

Una delle caratteristiche che rendono il truck platooning così interessante è la possibilità di implementare il sistema senza bisogno di rilevanti investimenti sull'infrastruttura. Questo permette di accorciare di molto l'orizzonte temporale su cui pianificarne la commercializzazione e di non dover dedicare ulteriori spazi all'infrastruttura stradale, inoltre rende questo tipo di soluzione molto più appetibile dal punto di vista economico. Bisogna però verificare che, nei rami in cui si pianifica di permettere la circolazione dei veicoli pesanti in platoon, l'infrastruttura sia in grado di assicurarne una circolazione sicura.

“We also need to pay attention to the infrastructure. In particular it is bridges in a state of disrepair, a lack of LTE coverage, poor road markings as well as heavy traffic and traffic jams that hinder the optimum use of platooning considerably”

Martin Zeilinger – Head of Advance Development at Daimler Trucks

Gli aspetti da considerare, quindi, sono molteplici.

- Viadotti: un headway ridotto implica una maggior concentrazione del carico, un allineamento quasi perfetto dei veicoli pesanti, inoltre, aumenta l'usura dell'opera in alcuni punti.
- Gallerie: in questo caso la tematica riguarda il livello di copertura del segnale ed i possibili ritardi di comunicazione, la gravità del problema dipende dalla zona geografica e dalla lunghezza della galleria
- Rotatorie: un platoon di veicoli pesanti è in grado di impedire l'immissione di altri veicoli da altri rami, inoltre l'immissione dell'intero platoon è subordinata a gap spaziali difficilmente riscontrabili in una rotatoria.
- Rampe di immissione: In questo caso il problema è simile a quello dell'immissione in rotatoria, è necessario un gap spaziale rilevante che spesso non

è disponibile in situazioni di traffico mediamente denso. Inoltre molte rampe di immissione non sono sufficientemente lunghe per permettere ad un intero platoon di stazionarvi in attesa della possibilità di immettersi.

- Rampe di uscita: In questo caso il problema riguarda gli altri veicoli e la loro manovra di uscita che può essere inibita se, fra loro e la rampa, è frapposto un truck platoon a sbarrare la strada.
- Analisi del rischio, quantificazione delle conseguenze nella situazione peggiore e nei punti più critici dell'infrastruttura (guard rail, gallerie, viadotti).
- Possibilità di corsie dedicate per alcune ore al truck platooning lungo i corridoi europei più rilevanti.

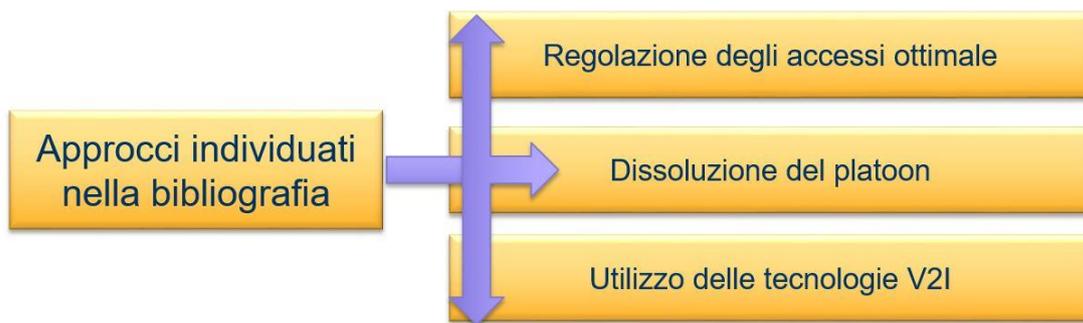


Figura 2.23: Approcci alle rampe

Durante il più rilevante evento su strada, l'European Truck Platooning Challenge, ci si è approcciati al problema delle rampe imponendo la dissoluzione dei platoon quando necessario. Dalle interviste seguenti ai conducenti, poi, è emerso come proprio le rampe costituiscano uno degli elementi più critici per questo tipo di sistema e come un headway di 0,8 secondi non fosse sufficiente ad impedire ai veicoli in entrata di inserirsi nella formazione. Due conducenti, inoltre, hanno espresso perplessità sulla lunghezza delle rampe tedesche, a loro giudizio non in grado di ospitare un intero platoon. In corrispondenza di una rampa, inoltre, è risultato particolarmente importante che tutti i partecipanti al platoon fossero consapevoli di far parte di un sistema, tenendo conto della posizione degli altri veicoli e di eventuali camion estranei accodatisi al platoon. Dalle interviste con i conducenti è emerso come l'interazione con altri camion possa essere più complessa di quella con altre automobili, molti conducenti hanno accolto con favore

l'ipotesi di segnalare in qualche modo la presenza del platoon per evitare incomprensioni (questo argomento verrà trattato più avanti citando "Study of communication needs in interaction between trucks and surrounding traffic in platooning" di Andersson et al. [7])

In seguito, nel paragrafo, verranno messi a confronto gli approcci trovati in letteratura riguardanti le rampe e le corsie dedicate.

2.5.1 Design and Control of Automated Truck Traffic at Motorway Ramps (2004) – Tabibi M.

Il lavoro in oggetto è una tesi facente parte del programma olandese TRAIL e studia il caso di corsie riservate a veicoli pesanti a guida automatica, nei corridoi della rete europea su cui il traffico merci è tale da giustificare questo tipo di soluzione. Vengono quindi analizzate le problematiche riguardanti i segmenti stradali in cui si immettono o si dipartono le rampe, zone nelle quali il traffico è composto tanto da veicoli tradizionali quanto da veicoli a guida automatica come quelli considerati in questolavoro. Nonostante questa tesi non sia strutturata principalmente sul caso dei veicoli pesanti in un platoon, viene comunque analizzata in quanto uno dei pochi riferimenti bibliografici reperiti consideranti l'ipotesi di una corsia completamente dedicata alla guida automatizzata (in cui comunque si ipotizza una marcia automatizzata ad headway ridotto). Il sistema di guida automatica ipotizzato dall'autore, infatti, è leggermente diverso da quella che sembra essere la soluzione predominante per il caso del truck platooning: anche in questo caso però i veicoli pesanti automatizzati sono controllati da un Traffic Control Center in grado di inviare ordini riguardanti la velocità, l'headway ridotto ed il tragitto, basati su modelli di ottimizzazione del traffico. E' comunque prevista la presenza di conducenti su ogni camion, per assicurare livelli di sicurezza adeguati.

L'impostazione della tesi è intesa a valutare la possibilità che l'automazione di una parte del traffico possa migliorare le condizioni di deflusso in quei segmenti dell'infrastruttura particolarmente critici, come ad esempio le rampe di ingresso e di uscita. Vengono, infatti, citate considerazioni di Minderhoud ed Hansen (2003) che in uno dei loro lavori hanno dimostrato come veicoli automatici, il cui headway è controllato da una figura esterna e

centrale, siano in grado di aumentare la sicurezza del flusso a valle di una rampa d'ingresso e la capacità e la velocità media di nel caso di un restringimento di carreggiata.

Una volta stabiliti i benefici derivanti dall'utilizzo di una corsia dedicata a veicoli pesanti a guida automatica, è importante stabilire in che modo permettere ai veicoli provenienti dalle rampe di ingresso di immettersi. Tramite un accurato studio della bibliografia disponibile l'autore ha concluso che l'utilizzo di una corsia di transizione tra le due modalità di guida sarebbe poco sicura per i veicoli a guida tradizionale, in caso di failure del sistema nei veicoli pesanti nella fase di passaggio dalla guida tradizionale a quella automatica. Inoltre il posizionamento della corsia riservata ai veicoli a guida automatica, come prima o terza corsia, impatta in maniera rilevante il flusso di traffico: se è la terza corsia a ed essere riservata, il fatto che i veicoli pesanti abbiano una dinamica così diversa dagli altri veicoli implica l'utilizzo di fly-overs o di semafori sulla carreggiata principale. Se invece è la prima corsia ad essere dedicata ai veicoli a guida automatica, l'autore auspica un approfondimento sulla possibilità di considerare una corsia di transizione. E' difficile immaginare che sia la corsia più a sinistra ad essere riservata al transito dei veicoli pesanti, ci si concentrerà quindi sulle analisi riguardanti la prima corsia riservata e si rimanda al lavoro oggetto di questo paragrafo per analisi più dettagliate delle altre casistiche.

L'autore offre, inoltre, uno spunto interessante prima di addentrarsi nella modellizzazione delle manovre di immissione ed uscita. Dal suo studio della bibliografia emerge come manchino casi di utilizzo di un modello mesoscopico per valutare l'impatto di veicoli pesanti sul flusso di traffico e la loro interazione coi veicoli a guida tradizionale. **Si tratta della tematica riscontrata più volte nei modelli di ottimizzazione legati al consumo di carburante, per quantificare questi benefici è necessario analizzare il traffico su un grafo ampio dell'infrastruttura ma non si può tralasciare l'aspetto microscopico legato alle singole manovre ed ai loro impatti sulla formazione del platoon.** In questo lavoro di tesi viene utilizzato un software di microsimulazione chiamato SiMoNe (Minderhoud M.M. Technical specification of SiMoNe, Delft University of Technology, Delft. 2001), in grado di definire un modello di ottimizzazione in grado di quantificare i benefici derivanti dall'implementazione di una corsia riservata e le ripercussioni sui segmenti critici dell'infrastruttura.

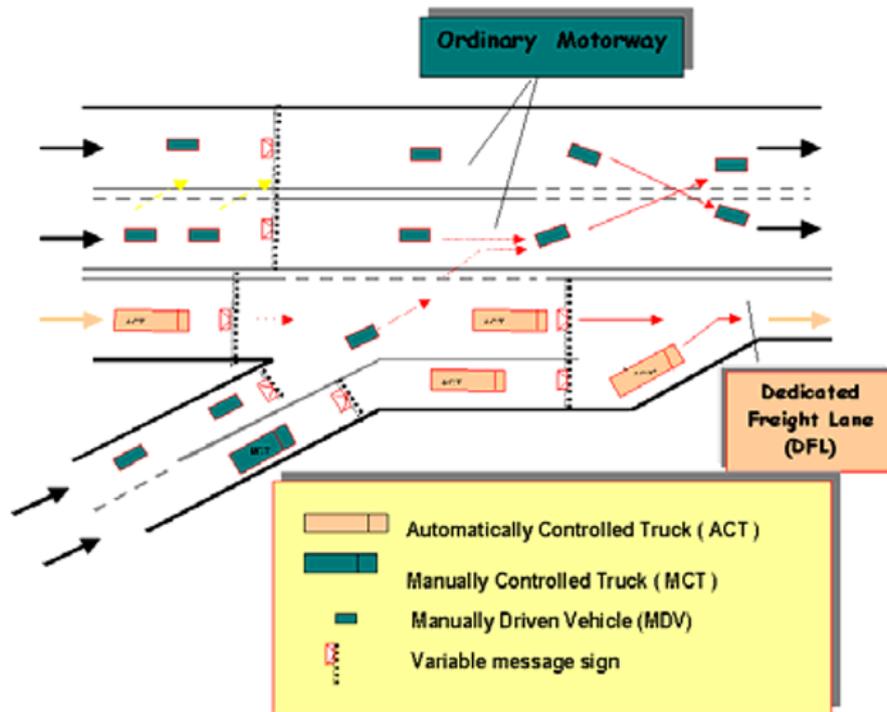


Figura 2.24: Dedicated freight lane - right

Una delle ripercussioni è evidentemente il calo del livello di servizio dell'infrastruttura per i veicoli a guida tradizionale, da giustificare quantificando precisamente i benefici legati al trasporto merci ed alla sicurezza dell'intero sistema. La configurazione in figura 2.19 risulta ottimale per quanto riguarda l'ingresso e l'uscita dei veicoli pesanti di cui, però, il deflusso è ostacolato dall'interferenza dei veicoli a guida tradizionale in immissione. Il posizionamento della corsia riservata sulla sinistra, al contrario, comporterebbe l'interruzione del deflusso dei veicoli tradizionali da parte dei veicoli pesanti, situazione giudicata più pericolosa dall'autore. Le simulazioni condotte con il software SiMoNe hanno confrontato il caso baseline in cui nessuna corsia è riservata, prima o terza corsia riservate ed il caso in cui nessuna corsia è riservata ma il traffico pesante è confinato nella prima corsia. Tutte le simulazioni sono su un ramo stradale comprendente una rampa di uscita ed una rampa di entrata e con il 100% di veicoli pesanti a guida automatica coordinata da un'autorità centrale. La densità del traffico è stata impostata ad un valore di 4000 veh/hr sulla carreggiata ed ad un valore di 1000 veh/h sulla rampa di entrata, le percentuali di traffico pesante considerate sono del 5,10,15,20,25% nel flusso principale e del 5,10,20,40% sulla rampa di entrata. La durata

di ogni simulazione è stata impostata di 4 ore con un input totale di circa 20000 veicoli. Si è assunto che i veicoli pesanti sulla rampa di uscita siano il 10%. Le simulazioni sono state quindi ripetute invertendo le percentuali sulle rampe di entrata e di uscita, in questo modo si sono potuto trarre delle conclusioni sia sull'impatto del flusso di veicoli pesanti a guida automatica in entrata che in uscita. Gli output del modello che si sono confrontati, alla fine, sono:

- Lunghezza delle code
- Numero dei veicoli che hanno attraversato una sezione
- Consumo medio di energia – numero di accelerazioni e decelerazioni
- Time To Collision

Questi output sono stati ottenuti in funzione del flusso sia sulle rampe in entrata sia sulle rampe in uscita.

Nel caso di traffico pesante variante tra il 5 ed il 25% sulla rampa di entrata, il flusso di traffico sul ramo principale non ha raggiunto la capacità quasi in nessun caso. Lo scenario peggiore è risultato quello con una presenza limitata di veicoli pesanti sul ramo principale (5%) ed, in contemporanea, veicoli pesanti sulla rampa in entrata pari al 40% del flusso totale, una situazione del genere, infatti, implica la massimizzazione delle interferenze tra i veicoli pesanti ed il resto del traffico. Le simulazioni hanno permesso di concludere che nessuno scenario presenta, in genere, una capacità più alta di quello in cui non si è riservata una rampa alla guida automatica ma è stato permesso ai camion di passare dalla prima alla seconda corsia e viceversa. L'autore ha concluso, inoltre, che in caso di flusso di veicoli pesanti limitato, attorno al 5%, sulla rampa di ingresso, non si ottiene una grande differenza nelle prestazioni riservando una corsia ai veicoli pesanti. Le considerazioni appena riportate riguardano il tempo di viaggio ed il numero di veicoli smaltiti dal ramo stradale, dal punto di vista energetico (basato sul numero delle accelerazioni e decelerazioni), l'autore ha tratto le seguenti conclusioni. Aumentando la percentuale di camion nel flusso principale, i risultati di tutti gli scenari tendono a convergere tra loro, quando questa percentuale è attorno al 5%, invece, i casi in cui si è riservata una corsia alla guida automatizzata hanno restituito un numero maggiore di accelerazioni e decelerazioni. Dal punto di vista energetico sembra che il caso migliore sia quello in cui nessuna corsia viene riservata ai veicoli pesanti e questi siano confinato

sulla prima corsia. Vale la pena far notare come le valutazioni qui riportate siano estremamente variabili in funzione delle percentuali di veicoli pesanti sul flusso principale e sulla rampa. Si rimanda al lavoro di tesi completo per un'analisi esaustiva di tutti i casi esaminati. Nel valutare il TTC e confrontarlo tra le varie casistiche, l'autore ha tenuto come valore limite quello di 1,5 secondi⁷, sotto il quale lo scenario viene considerato "unsafe". **Nonostante questo caso non consideri esplicitamente il truck platooning, gli input ipotizzati dall'autore possono essere presi come riferimento per analizzare l'opportunità di riservare la prima corsia a questo modo di trasporto, con minime modifiche.**

Il secondo insieme di output restituiti dal modello ha riguardato il caso in cui la presenza di veicoli pesanti varia tra il 5 ed il 25% sulla rampa di uscita. Il caso in cui si è riservata la prima corsia al flusso di veicoli a guida automatica ha raramente portato al raggiungimento della capacità del ramo stradale, l'unico caso in cui i flussi sono entrati in conflitto è stato quello in cui un rilevante flusso di macchine a guida tradizionale in uscita dal ramo principale ha ostacolato il deflusso dei veicoli pesanti, vale la pena evidenziare come, per il truck platooning, solo l'alternativa della prima corsia dedicata abbia un senso. I risultati hanno mostrato come, per una percentuale più elevata di veicoli pesanti nel flusso principale, il tempo di viaggio risulta più simile tra questi e le macchine, inoltre con oltre il 20% di camion nel flusso principale il caso di prima corsia riservata restituisce output simili al caso baseline. **Dal punto di vista energetico, continuando a considerare accelerazioni e decelerazioni, i risultati hanno indicato come una prima corsia riservata sia paragonabile agli altri scenari solo per un flusso di veicoli pesanti sul ramo principale di oltre il 25%.** L'autore ha, inoltre, sottolineato come, dal punto di vista energetico, convenga considerare non solo gli output riguardando i veicoli pesanti ma anche l'impatto che la loro disposizione sul ramo ha avuto sulle accelerazioni e decelerazioni dei veicoli tradizionali. La grande aleatorietà dei risultati, soprattutto dal punto di vista della sicurezza e del TTC, costituisce una problematica rilevante che costringe a considerare la possibilità di un'assegnazione dinamica delle corsie, legata ad una forte comunicazione V2I e ad un centro di controllo. **Nell'ottica del truck platooning questa soluzione può risultare più conveniente del caso analizzato**

⁷ Hoogendoorn and Minderhoud (2001)

dall'autore in quanto sono pochi i corridoi in cui il flusso di merci è tale da giustificare una corsia dedicata. L'allocazione dinamica però è in grado di garantire un deflusso inalterato dei veicoli a guida tradizionale durante le ore di punta ed una maggior flessibilità nell'utilizzo del truck platooning ad esempio nelle ore notturne.

In generale una maggiore flessibilità risulta benefica in quasi tutti gli aspetti legati al truck platooning, siano questi l'headway, la corsia riservata o il numero di veicoli in formazione. Separare i flussi di traffico in questo modo, infatti, può permettere di ipotizzare platoon più lunghi con un headway ristretto, i benefici derivanti da questo tipo di soluzione però non sono ancora stati analizzati, così come non si sono studiati i limiti che il sistema può raggiungere nell'ipotesi di corsia dedicata o di traffico notturno.

Una volta condotti i due set di simulazioni l'autore ha esposto alcune considerazioni. In primo luogo non è consigliabile considerare l'implementazione di una corsia riservata alla guida automatica di veicoli pesanti quando questo sono presenti per meno del 10% del totale. In generale, inoltre, riservare la terza corsia è una soluzione svantaggiosa se non ci sono sistemi di ramp-metering o comunque di separazione tra i camion e gli altri veicoli sulle rampe. Una corsia di destra riservata, invece, è la soluzione più competitiva quando il numero di camion nel flusso principale supera il 20% ed il numero di veicoli pesanti sulle rampe va oltre i 150-200 per ora.

In questo lavoro di tesi l'autore tratta di un'altra tematica molto interessante: le buffer area. Una buffer area è una sezione dell'infrastruttura ampliata di una o più corsie per fornire spazio addizionale per i veicoli in coda. In questo modo la densità delle code è aumentata e si aggiunge capacità all'infrastruttura tramite il nuovo spazio. Nel caso di studio un elemento del genere risulta interessante per la possibilità di creare corsie dedicate a specifici gruppi di utenti, come ad esempio i camion a guida automatica.

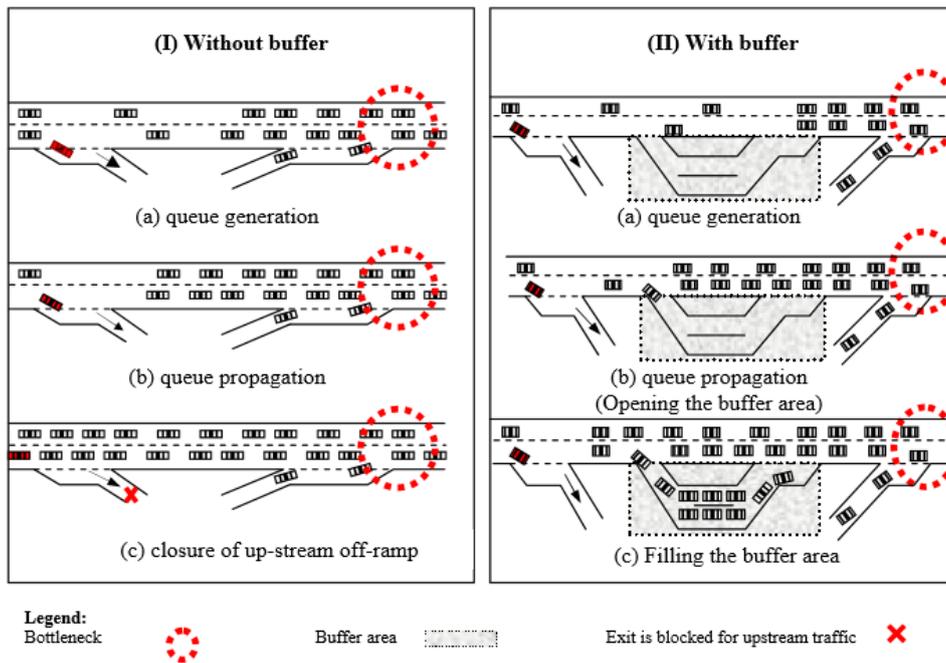


Figura 2.25: Buffer area - Design and control of Automated Truck Traffic at Motorway ramps

La presenza di una buffer area permette di regolare il flusso in input che si avvicina al collo di bottiglia, tramite la presenza di lanterne semaforiche all'uscita. Se il flusso è composto solo da veicoli tradizionali, però, la buffer area è in grado solo di assorbire la propagazione della coda e non di evitare la congestione, se invece il traffico è composto anche da veicoli pesanti a guida automatizzata risulta possibile ridurre i fenomeni di congestione in prossimità delle rampe. L'autore nello studio ha ipotizzato, infatti, una mainline buffer in grado di controllare, tramite coordinamento centrale, il flusso di veicoli pesanti poco prima rampe di immissione e limitare le interazioni con i veicoli tradizionali che hanno costituito le principali problematiche analizzate nella prima parte della tesi.

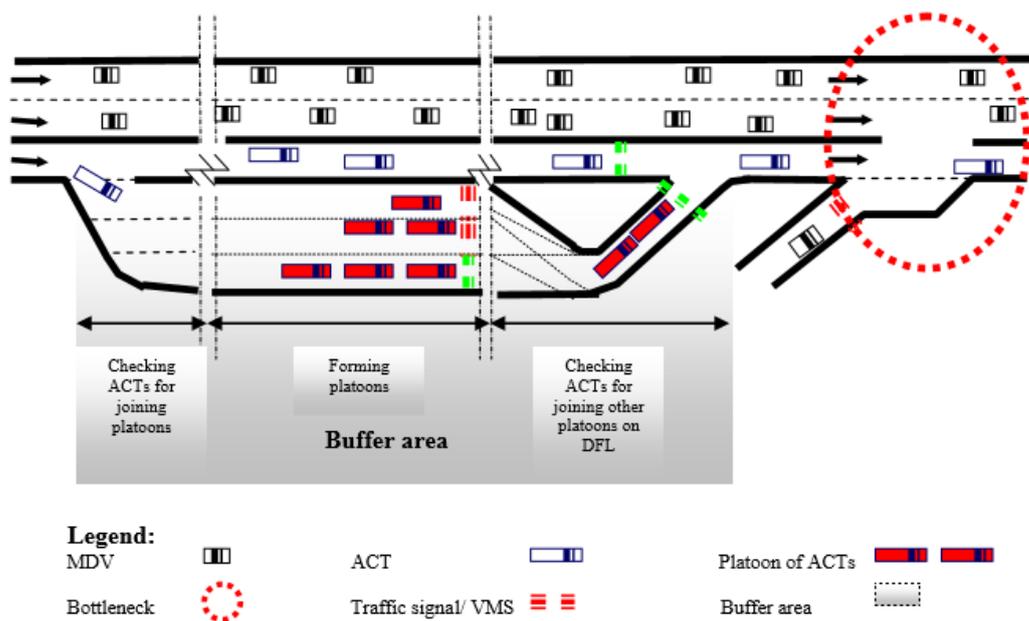


Figura 2.26: Mainline buffer - Design and control of Automated Truck Traffic at Motorway ramps

Alla mainline buffer, inoltre, ha imputato il compito di riduzione dell'headway ed il passaggio del camion dalla guida tradizionale a quella automatica. L'autore fa esplicitamente riferimento al truck platooning nel testo e nella mainline buffer ha ipotizzato il riordino dei veicoli in modo da far sì che si accodassero quelli aventi destinazione comune, vale la pena far notare però come il sistema impostato si discosti dall'approccio emerso negli ultimi anni per quanto riguarda il truck platooning e comportamenti investimenti e tempistiche che non sembrano in linea con le strategie di implementazione formulate dai vari stakeholders. **Una maggiore rigidità nelle manovre di formazione del truck platooning, inoltre, rischia di limitarne in maniera drastica i benefici derivanti, soprattutto se si identificano pochi, predefiniti punti in cui questa possa avvenire.**

Nel modellizzare una corsia completamente riservata, l'autore ha assunto i seguenti parametri:

- $S_{int\ ra}$ = Headway tra i camion in un platoon = 10 m
- $S_{int\ er}$ = Distanza tra due successivi platoon = 150 m
- L = Lunghezza media di un camion = 14 m

- N = Numero di veicoli in un platoon = 10
- $V_{plat} = 88 \text{ km/h}$
- Cap = Capacità di un flusso ininterrotto di platoon su una corsia dedicata

$$cap = \frac{3600 * N}{s_{int ra}(N - 1) + L * N + s_{int er}} v_{plat} = 2300 \frac{trucks}{h}$$

Tale valore è comunque teorico e non tiene conto delle manovre di immissione ed uscita. L'incremento così ottenuto è circa pari ad un aumento di capacità del 53% sulla corsia dedicata.

Per quantificare l'impatto che le rampe di ingresso e di uscita possono avere sul deflusso del platoon si è simulato, nuovamente tramite il software SiMoNe, un tratto di strada con la corsia di destra dedicata al truck platooning ed una rampa di ingresso a 2 km dal punto di origine del traffico. La simulazione è stata condotta per quattro ore e sei rilevatori sono stati utilizzati per aggregare i dati risultanti con un intervallo di 5 minuti. Per raggiungere la capacità del ramo stradale nel caso di truck platooning nella corsia dedicata il software ha generato un elevato flusso di macchine e camion sia sul ramo principale che sulla rampa, sulla quale si è assunta una percentuale di veicoli pesanti pari al 10%. Anche in questo caso si è assunto che tutti i veicoli pesanti fossero dotati dello stesso livello di automazione di supporto alla guida. In questo caso la baseline considerata è quella del caso in cui nessun camion forma un platoon sulla corsia dedicata. Nella definizione dei vari scenari si sono fatti variare i seguenti parametri: numero di veicoli massimo in un platoon, numero iniziale di veicoli in un platoon, headway, distanza tra platoon, velocità, accelerazione e decelerazione massima dei veicoli formanti il platoon e lunghezza dei camion. Anche in questo caso per tutti i risultati numerici si rimanda al lavoro di cui si sta trattando, di seguito verrà fornita una panoramica sugli output e sulle considerazioni dell'autore.

- Al variare del numero di veicoli massimo in un platoon nessuno degli scenari ha mostrato prestazioni di deflusso maggiori rispetto a quello di riferimento
- Aumentando il numero di veicoli massimo in un platoon tutti gli indicatori di prestazione migliorano
- Lo scenario di truck platooning presenta un numero molto minore di accelerazioni e decelerazioni, nonché un miglior TTC

- Incrementando il numero iniziale (prima di entrare nella corsia riservata) di veicoli pesanti in un platoon da 2 a 5 la capacità risulta incrementata del 10%
- Valutando la capacità, il tempo di viaggio ed il TTC risulta come il numero di 5 veicoli formanti un platoon sia quello ottimale
- Il valore ottimale dell'headway dipende dal volume del traffico di auto in entrata, il layout della sezione considerata ed il livello di sicurezza richiesto funzione del TTC
- Un'interdistanza di 50 m tra due platoon nella corsia riservata restituisce prestazioni migliori rispetto lo scenario di riferimento
- Un valore di velocità di 85 km/h per il platoon restituisce il 21% in meno di situazioni a rischio ($TTC < 1,5$ s) rispetto ad un valore di 55 km/h. Ciò è da imputare ad una maggiore omogeneità tra il flusso di camion e quello dei veicoli tradizionali.
- Una variazione dei valori di accelerazione e decelerazione tra 1 e 4 m/s^2 non restituisce alcuna differenza rispetto il caso standard di 2 m/s^2 .
- La disaggregazione dei platoon in corrispondenza di una rampa risulta in un incremento della capacità del 7% rispetto al caso baseline e del 15% rispetto al caso di mantenimento della formazione. Questo risultato è di notevole importanza perché, allo stato attuale delle cose, la disaggregazione del platoon in corrispondenza delle rampe è l'unica strategia considerata nelle dimostrazioni su strada ed, insieme al ramp metering, l'unica formulata per la gestione di queste situazioni. Il punto in cui disaggregare il platoon dipende dalla densità del traffico.
- La formazione del platoon a valle delle rampe di entrata può rappresentare uno scenario a rischio ($TTC < 1,5$ s) a causa delle shockwave che si diffondono dal merging point a monte, fino alla rampa di entrata.

Le stesse simulazioni sono state condotte nel caso delle rampe in uscita, la differenza più significativa è costituita dalla percentuale di veicoli uscenti implementati nel modello, pari al 20%. L'autore ha quindi espresso le seguenti considerazioni:

- Al variare del massimo numero di veicoli costituenti un platoon, nessuno degli scenari presenta prestazioni migliori rispetto al caso baseline. In tutti gli scenari si ha, infatti, una riduzione della capacità ed un aumento dei tempi di viaggio.

Non si sono registrati miglioramenti neanche nel numero di accelerazioni e decelerazioni o nel TTC.

- Anche in questo caso un numero iniziale più alto di veicoli in un platoon comporta miglioramenti dal punto di vista della capacità e della sicurezza.
- Un numero iniziale di 5 veicoli in un platoon restituisce una capacità simile a quella dello scenario di riferimento a fronte di un lieve aumento del tempo di viaggio, della congestione e del numero delle accelerazioni. Si registra anche una diminuzione del livello di sicurezza, il tutto in confronto alla simulazione di riferimento.
- Lo scenario di truck platooning in corrispondenza delle rampe di uscita registra un maggior numero di accelerazioni e decelerazioni per le macchine nel ramo principale, da imputare alla ricerca di un gap sufficiente alla manovra di uscita.
- L'impatto dell'headway nel caso delle rampe di uscita è diverso rispetto alle rampe in entrata. In questo caso infatti una riduzione dell'headway non comporta cambiamenti significativi di capacità.
- Le stesse considerazioni espresse sulla velocità mantenuta dai platoon sembrano valere anche nel caso delle rampe in uscita. Nessuno degli scenari consideranti il platoon ha portato ad un miglioramento delle prestazioni rispetto allo scenario di riferimento.
- Anche dal punto di vista del numero di accelerazioni e decelerazioni vale quanto espresso per le rampe in entrata.
- I risultati ottenuti dal modello sembrano indicare che la disaggregazione del platoon a monte delle rampe in uscita porti ad un aumento delle performance. Questo approccio inoltre restituisce circa il 50% del numero medio di accelerazioni e decelerazioni rispetto allo scenario di riferimento.

Sulla base delle simulazioni effettuate e dei risultati, l'autore ha quindi evidenziato come possa rendersi necessario l'utilizzo di lanterne semaforiche per regolare l'accesso e l'uscita alle rampe, questo per tener conto delle possibilità che il sistema di guida automatica entri in crisi o che il conducente di un veicolo tradizionale esegua una manovra pericolosa. Questo tipo di ipotesi aumenterebbe ulteriormente l'incidenza del truck platooning sull'infrastruttura esistente e per questo non verrà ulteriormente approfondita, si rimanda al lavoro di tesi di Tabibi Masoud per ulteriori approfondimenti

a riguardo. E' però opportuno evidenziare che l'autore, nel considerare le possibili soluzioni applicabili per diminuire la pericolosità nelle interazioni tra veicoli tradizionali e non, ha indicato come possibili approcci la creazione di una corsia dedicata alle auto in uscita dal flusso principale (ugualmente invasiva) o l'implementazione dell'Intelligent Speed Adaptation (ISA) sulle auto in avvicinamento alla rampa di uscita regolata da lanterna semaforica. Entrambe le soluzioni non sembrano attuabili, allo stato delle cose, nei primi anni dall'entrata in commercio del truck platooning (orizzonte temporale 2020).

Si riportano quindi le conclusioni dell'autore al termine del lavoro di tesi, del quale in questa sede non si sono analizzati nel dettaglio i capitoli riguardanti il modello di ottimizzazione ed i diversi approcci con cui modellizzare le buffer area. L'utilizzo di camion a guida automatizzata e di un oculato modello di ottimizzazione può comportare un incremento della capacità presso le rampe di uscita anche del 18%, una riduzione del tempo di viaggio del 10% per tutti i veicoli e del 40% del numero di accelerazioni e decelerazioni. Maggiori valori del TTC rientrano tra i vari benefici del truck platooning alle rampe di uscita. Per le rampe in entrata i benefici si sono concretizzati in un minor numero di accelerazioni e decelerazioni (20%) e maggiori TTC, piuttosto che in un incremento di capacità. **Uno spunto interessante che merita di essere approfondito riguarda le ore notturne**, la guida automatica di cui si tratta nel lavoro di tesi, ma anche la semplice rotazione dei conducenti nei vari veicoli, può aumentare di molto le ore di marcia notturne in cui alcune delle limitazioni legate alla sicurezza possono essere rilassate in funzione dei minori flussi di traffico. Ciò può avvenire solo con un adeguamento della legislazione che, al momento, non permette che un conducente dei following vehicle si riposi mentre è il leading vehicle a condurre. Bisogna evidenziare, comunque, come questo adeguamento difficilmente verrà effettuato prima dell'entrata in commercio del truck platooning, prevista con un livello di automazione L2 e quindi con un conducente ancora pienamente coinvolto nel loop di guida. Questa potenzialità quindi diventerà rilevante solo in fasi successive, con la possibile eccezione degli impatti benefici dovuti al traffico ridotto durante le ore notturne. Un'altra considerazione dell'autore fornisce un ulteriore spunto, la modellizzazione di una o due rampe con il livello di dettaglio adottato non è possibile per tutta la rete stradale, questo vuol dire che non è possibile applicare questo modello per ottenere impatti sulla capacità, sulle emissioni o sulla sicurezza derivanti dall'implementazione della corsia riservata

sull'intera porzione di infrastruttura. Inoltre, la definizione di un'analisi costi benefici ed un'analisi del rischio per tutti i possibili scenari è auspicata, così come un ulteriore sviluppo del modello di ottimizzazione per la regolazione semaforica alle rampe e che possa tener conto di una gestione dinamica del traffico. Si ripropone inoltre la necessità di un'ulteriore definizione dei parametri in input, come la resistenza aerodinamica o il risparmio di carburante, che avrebbe permesso di ottenere risultati più aderenti alla realtà. Per quanto riguarda la modellizzazione di interventi sull'infrastruttura e sulle rampe, ulteriori lavori dovrebbero comprendere output come il tempo medio di attesa per veicoli tradizionali e per veicoli a guida automatica.

Come accennato in precedenza le combinazioni di input adottate nelle simulazioni sono molte e restituiscono una discreta mole di output in ogni scenario. Per la tabulazione completa di tali grandezze si rimanda al lavoro di tesi di Tabibi M., di seguito si riportano solo gli input generici validi per ognuno degli scenari analizzati dal modello.

	INPUT	OUTPUT
<i>Headway spaziale [m]</i>	10	
<i>Distanziamento tra due platoon [m]</i>	150	
<i>Lunghezza media di un camion [m]</i>	14	
<i>Numero massimo di veicoli in un platoon</i>	10	
<i>% di veicoli pesanti sulla rampa di entrata – simulazione rampa di entrata</i>	5-10-15-20-25	

<i>% di veicoli pesanti sulla rampa di uscita – simulazione rampa di uscita</i>	20	
<i>Vplatoon[km/h]</i>	88	
<i>TTCsafe [s]</i>	1,5	
<i>TTCcomfort [s]</i>	3	
<i>Capacità di un flusso ininterrotto di platoon su una corsia dedicata [trucks/h]</i>		2300

Tabella 2-9: Design and Control of Automated Truck Traffic at Motorway ramps - Tabibi M.

2.5.2 Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis (2016) – Deng Q.

In questo lavoro di tesi uno dei paragrafi è stato dedicato alla modellizzazione della manovra di disaggregazione del platoon in corrispondenza di una rampa di uscita. Il tratto di strada considerato è di 6 km, la rampa è stata collocata a 4,3 km dalla sezione generatrice del flusso di traffico. Si sono ipotizzate due corsie nel modello, ognuna con un flusso medio di 1600 veicoli all'ora ed una velocità media desiderata di 110 km/h (con una deviazione standard di 5 km/h). 20% delle automobili in transito sul ramo principale hanno cercato di imboccare la rampa di uscita, un platoon composto da 5 veicoli pesanti è stato fatto partire 350 secondi dopo l'inizio della simulazione con una velocità desiderata di 80 km/h ed un headway di 10 m (gap spaziale). Come scenario di riferimento si è tenuto quello in cui il platoon non si è separato, la simulazione è stata ripetuta 50 volte. Un parametro importante, assunto in base ad un altro studio dello stesso autore⁸, è il tempo impiegato al platoon per effettuare la manovra di disaggregazione pari a 150

⁸ Q. Deng. A constant spacing policy for heavy-duty vehicle platoon disaggregation at highway off-ramp

secondi, in questo intervallo il platoon di cinque veicoli ha portato gli headway da 10 a 100 m. Si è ipotizzato che questa manovra, per motivi di sicurezza, terminasse a 100 metri dalla rampa. Con i dati ipotizzati si è ottenuta la distanza minima, a monte, in cui la manovra deve risultare completata, pari ad 866 m. Perché ciò si verifichi, la manovra deve essere iniziata a 3434 metri dalla rampa di uscita, una volta che l'headway è stato portato a 100 metri il CACC si considera disattivato ed il guidatore deve aver ripreso controllo del veicolo. Dal confronto con il caso di riferimento è stato possibile notare che, nel caso di mancata disaggregazione del platoon, la velocità media della corsia di destra decresce a causa dei veicoli che hanno intenzione di effettuare la manovra di uscita. Poiché la presenza del platoon impedisce tale manovra, i veicoli sulla corsia di sinistra rallentano in attesa che il platoon sia passato e, solo allora, possono cambiare corsia ed imboccare la rampa di uscita. Questa manovra a sua volta causa un rallentamento per i veicoli sulla corsia di destra che devono permettere ai veicoli sulla corsia di sinistra di arrivare alla rampa di uscita.

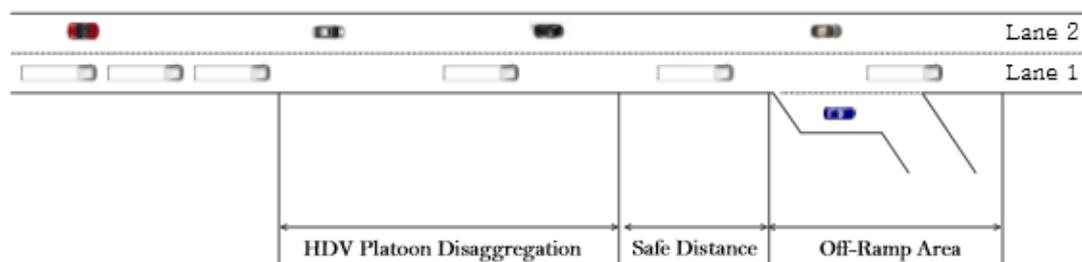


Figura 2.27: Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis (2016) – Deng Q

Nel caso in cui il platoon effettui la manovra di disaggregazione in tempo, invece, la velocità media della corsia di destra decresce rapidamente negli istanti iniziali, a causa della decelerazione dei veicoli formanti il platoon. I veicoli sulla corsia di sinistra, invece, sono in grado di approfittare del gap formatosi tra i veicoli del platoon e possono effettuare la manovra di uscita, la loro velocità media quindi ritorna ai valori di velocità desiderata più rapidamente. Questo lavoro di tesi verrà ripreso nel paragrafo sulla modellizzazione del platoon, in questo contesto si riportano solo le considerazioni dell'autore sul modello utilizzato. Si è utilizzato il software VISSIM, considerando i parametri di default per il car-following e le manovre di cambio corsia, per applicazioni

pratiche si auspica una calibrazione e validazione dei parametri in considerazione delle specificità dello scenario considerato.

	INPUT	OUTPUT
<i>Ramo stradale simulato [km]</i>	6	
<i>Distanza tra sezione iniziale e rampa di uscita [km]</i>	4,3	
<i>Numero di corsie modellizzate</i>	2	
<i>Deflusso [veh/h/corsia]</i>	1600	
<i>Velocità media desiderata [km/h]</i>	110	
<i>% di automobili in procinto di imboccare la rampa di uscita</i>	20	
<i>Numero di veicoli nel platoon</i>	5	
<i>Δt inizio simulazione – partenza del platoon [s]</i>	350	
<i>$V_{platoon}$[km/h]</i>	80	
<i>Headway [m]</i>	10	
<i>Distanza tra i veicoli per l'interruzione del platoon [m]</i>	100	
<i>Numero di simulazioni effettuate</i>	50	
<i>Tempo necessario alla manovra di disaggregazione [s]</i>	150	
<i>Distanza minima dalla rampa a cui deve essere disfatto il platoon [m]</i>		866

<p><i>Distanza minima dalla rampa a cui deve iniziare la manovra di disaggregazione [m]</i></p>		<p>3434</p>
---	--	-------------

Tabella 2-10: Heavy-Duty Vehicle Platooning - Modeling and Analysis - Deng Q.

2.5.3 Cooperative Communication Network for Adaptive Truck

Platooning (2017) – Gheorghiu R. A., Iordache V., Cormos A. C.

Il presente studio è stato redatto con lo scopo di rendere più efficiente la manovra di sorpasso del truck platoon da parte di veicoli tradizionali. Uno dei fattori limitanti la lunghezza di un platoon, infatti, è la difficoltà di sorpasso da parte di altri utenti della strada che, soprattutto negli stadi iniziali dall'entrata nel mercato del truck platooning, possono interpretare in modo scorretto la situazione ed eseguire manovre potenzialmente pericolose. La strategia ipotizzata dagli autori per mitigare i rischi legati al sorpasso prevede che il platoon possa modificare dinamicamente l'headway tenuto dai veicoli, permettendo al convoglio di "spezzarsi" in due platoon più piccoli e lasciare un gap spaziale sufficiente perché il veicolo sorpassante possa inserirsi tra quelli in formazione ed eseguire la manovra di sorpasso in più step. Nonostante l'analisi di questa Conference Paper sia stata inserita nel paragrafo riguardante le problematiche legate al rapporto truck platooning - infrastruttura, l'impostazione del lavoro fa fortemente riferimento alle potenzialità delle comunicazioni V2V e V2I di cui si tratterà approfonditamente nel capitolo 3 di questa tesi. Lo scenario di riferimento analizzato dagli autori, infatti, è quello in cui tutti i veicoli presenti sull'infrastruttura siano in grado di comunicare col platoon e con l'infrastruttura (con un orizzonte temporale, quindi, più avanzato rispetto al 2020). Nel definire l'headway tenuto, quindi, il leading ed i following vehicle rilevano la presenza o meno di altri veicoli, minimizzando il gap mantenuto per livelli minimi di densità del traffico. Alla luce degli altri lavori analizzati è evidente come tale headway, in linea generale, debba restare limitato anche per densità del traffico moderate ma non tali da impedire una tempistica manovra di disaggregazione, nonostante infatti gli autori

abbiano previsto cut-ins durante le manovre di sorpasso non bisogna che i gap siano tali da incoraggiarne un numero eccessivo (la determinazione di questo valore non è ancora stata determinata univocamente e dipende fortemente dalla propensione regionale degli automobilisti a guidare in maniera più o meno aggressiva). Una volta che il veicolo deciso a soprassare il platoon abbia comunicato la sua presenza e si sia formato il gap sufficiente ad accoglierlo, gli autori hanno privilegiato come approccio che il convoglio si spezzi in due platoon distinti, questo per evitare che una distanza troppo grande tra due veicoli pesanti possa comportare pericolosi ritardi di trasmissione e per mitigare i rischi legati al comportamento imprevedibile del veicolo esterno al platoon.

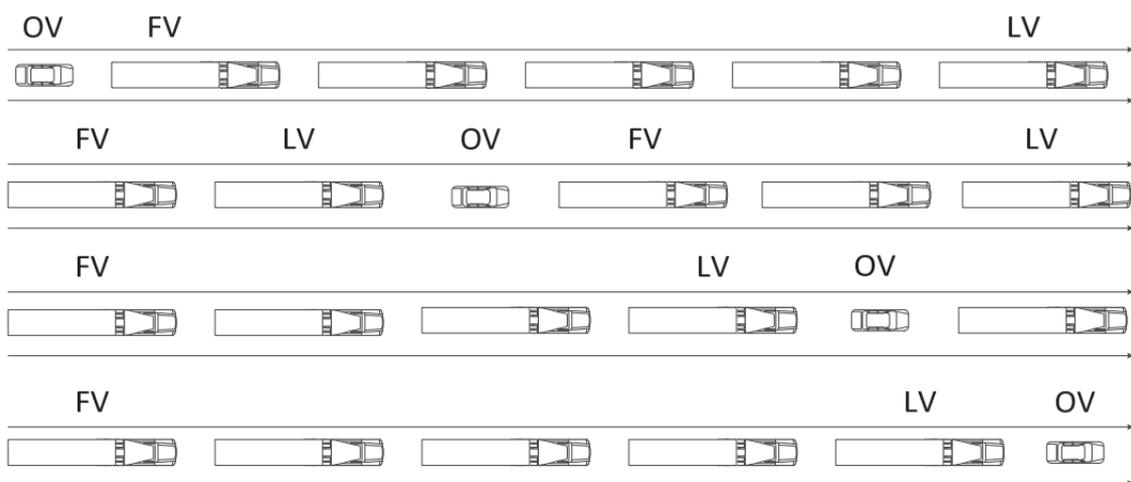


Figura 2.28: Manovra di sorpasso [85]

Per come è impostata la manovra di sorpasso illustrata dagli autori, ogni following vehicle deve essere in grado di diventare leading vehicle e, quindi, l'avviso ai conducenti deve essere fornito con il giusto anticipo perché questi possano riprendere il controllo del veicolo. In riferimento ad una tematica che verrà approfondita nel paragrafo 2.7. si riporta una considerazione interessante espressa dagli autori per i quali è opportuno che ogni veicolo pesante in formazione nel platoon sia dotato di un pannello a messaggio variabile che possa comunicare agli altri utenti della strada quando è possibile eseguire la manovra di sorpasso ed, in questo caso, quanti camion superare di volta in volta. E' evidente l'impatto che un tale equipaggiamento avrebbe sul costo del veicolo, per cui risultano auspicabili

Una volta definito il principio secondo cui l'headway è in grado di variare ed il platoon è in grado di spezzarsi, quindi, gli autori hanno applicato questi concetti di platoon

dinamico per cercare di risolvere il problema costituito dal “wall of trucks” in corrispondenza di una rampa di uscita. Nello scenario delineato, infatti, è possibile che un veicolo intenzionato ad imboccare la rampa di uscita comunichi questa necessità al platoon in viaggio sulla prima corsia. E’ fondamentale, però, che il veicolo in uscita comunichi esattamente la sua posizione, in modo che il gap riservatogli si apra nel punto giusto del platoon, non è quindi sufficiente il livello di precisione garantito dal solo sistema GPS, è necessario vi sia un sistema di riferimento garantito da postazioni V2I presenti nei tratti di infrastruttura in prossimità delle rampe.

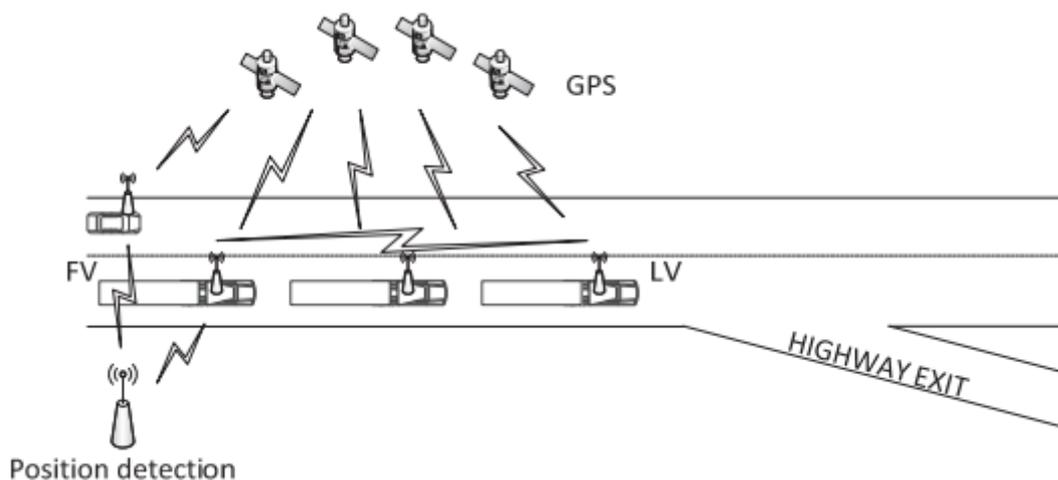


Figura 2.29: Sistema V2I (Vehicle to Infrastructure) [85]

E’ fondamentale che i flussi di informazioni viaggino con sufficiente rapidità da permettere al platoon di separarsi ed al veicolo intenzionato ad imboccare la rampa di inserirsi nel gap dedicatogli. Esiste quindi una distanza minima a cui la comunicazione tra platoon e veicolo esterno deve avvenire, maggiore della distanza che separa il platoon dalla rampa.

$$d = l_{el} + v_{pt}(t_{gap} + t_{in}) + d_{syn} + v_{ov} * t_{COM}$$

Dove l_{el} rappresenta la lunghezza della corsia di uscita, v_{pt} è la velocità di marcia tenuta dal platoon ed a cui deve adeguarsi il veicolo in uscita, t_{in} è il tempo necessario al veicolo in uscita per occupare il gap, d_{syn} è la distanza che questo impiega per rallentare fino a v_{pt} , v_{ov} è la sua velocità iniziale e t_{COM} è il tempo necessario perché avvenga lo scambio di informazioni. t_{rt} è il tempo necessario al platoon per formare il gap, gli autori non hanno

approfondito come la densità del traffico circostante possa rallentare questa manovra o inibirla completamente, **nel caso di adozione di un sistema simile per la regolazione delle uscite sembra necessaria una valutazione mirata che tenga conto delle caratteristiche dell'infrastruttura e delle correnti di traffico circolante**. Altri fattori da cui dipende la separazione in due platoon separati sono la lunghezza del veicolo esterno, la distanza di sicurezza da mantenere con tale veicolo e la capacità di decelerazione dei camion. La distanza necessaria a cui deve essere comunicata la manovra di uscita al termine della trattazione risulta:

$$D > d = v_{ov} * t_{COM} + \frac{v_{ov} * v_{pt} + v_{pt}^2}{a_{brv}} + v_{pt} * \left(t_{sig} + \frac{w_l}{v_{lat}} + \sqrt{\frac{2(l_{ov} + 2d_s)}{a_{brt}}} \right) + l_{el}$$

Dove d_s è la distanza di sicurezza, a_{brt} il valore di decelerazione massimo, l_{ov} la lunghezza del veicolo esterno e t_{sig} il tempo necessario per il segnalamento di cambio corsia. Con questa impostazione del sistema il platoon è in grado di calcolare se lo spazio tra questo e l'uscita è sufficiente, in caso contrario la richiesta del veicolo esterno deve essere respinta e deve essergli indicato di attendere l'uscita successiva.

2.6 Modellizzazione delle possibili manovre

“While control of platoons is currently being developed as a commercial product for trucks, only few contributions on when, where, and how platoons should be formed are available in the literature” (Sebastian Van De Hoef, Fuel-Efficient Centralized Coordination of Truck Platooning 2016)

E' importante poter modellare le interazioni di un platoon di camion con gli altri veicoli presenti sulla strada, molti degli algoritmi utilizzati per quantificare il consumo di carburante, infatti, hanno dovuto ignorare i possibili ritardi nella formazione del platoon dovuti alla congestione ed ad altri veicoli accodati al leading vehicle. Le stesse tematiche si ripropongono nel caso di disaggregazione del platoon che deve poter avvenire in tempi certi per esser sicuri che ogni conducente abbia ripreso il controllo del proprio veicolo prima di una rampa, di un restringimento di carreggiata o di una galleria particolarmente

lunga. Poter inoltre modellare con precisione le manovre di soprasso da parte di altri veicoli o manovre di cambio corsia dell'intero platoon può essere particolarmente importante dal punto di vista della previsione del rischio. In questo paragrafo, quindi, si cercherà di fare il punto di tutte le metodologie adottate dai vari autori per modellare particolari situazioni di guida per il sistema del truck platooning, indicando il software utilizzato, gli input assunti e gli output ritenuti significativi. Per essere in grado di sfruttare tutte le potenzialità del truck platooning il service provider, nel dare indicazioni, dovrebbe calcolare con un grado di precisione accettabile il ritardo nell'esecuzione della manovra prevista, per valutare se valga la pena eseguirla o meno (ad esempio un ritardo eccessivo nella formazione del platoon comporterebbe un susseguirsi di accelerazioni e decelerazioni a fronte di benefici limitati nei consumi). Allo stesso modo però è fondamentale che il modello utilizzato restituisca l'impatto della manovra del platoon prevista sul traffico tradizionale, assicurandone la sicurezza in ogni interazione tra le due modalità di guida. La modellizzazione delle interazioni del platoon con il mondo circostante è fortemente legata alle caratteristiche geometriche dell'infrastruttura, alla composizione del traffico circostante, alla percentuale stimata di penetrazione nel mercato dei sistemi CACC ed a molte altre caratteristiche come ad esempio il comportamento difficilmente prevedibile del singolo conducente. E' quindi molto più semplice (e restituisce risultati senz'altro più precisi) modellizzare porzioni circoscritte di rete stradale, di certo non ampie quanto l'intera rete europea, è però necessario che il numero delle simulazioni così effettuate sia alto, per poter avere un quadro generale della situazione su tutto il territorio europeo e poter quanto meno fare previsioni sugli sviluppi futuri. Si riporta di seguito uno schema riassuntivo di tutte le grandezze input dei vari modelli che si andrà ad analizzare e degli output restituiti.

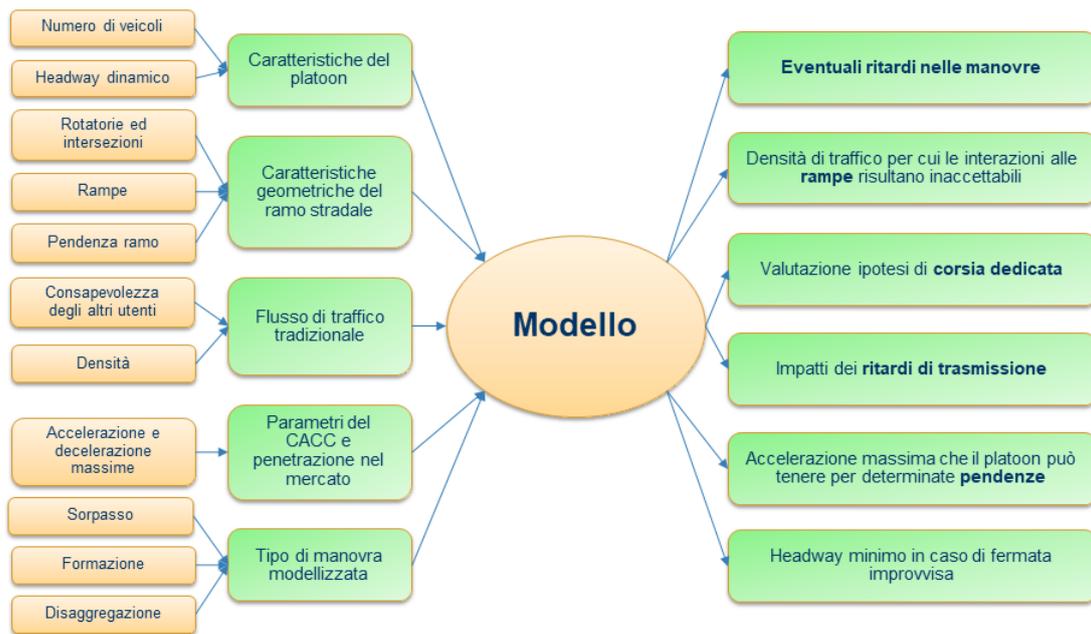


Figura 2.30: Modellizzazione-schema riassuntivo

2.6.1 The influence of Traffic on Heavy-Duty Vehicle Platoon Formation (2016) – Liang K., Deng Q., Mårtensson J., Ma X., Johansson K. H.

In questo articolo gli autori hanno cercato di quantificare il ritardo nella manovra di formazione di un platoon composto da due camion, dovuto all'interazione con il traffico circolante, in funzione di diverse densità di traffico. L'articolo quindi analizza un ramo autostradale a due corsie lungo 50 km in cui due veicoli pesanti hanno intenzione di formare il platoon, cercando di determinare il ritardo nell'esecuzione della manovra dovuto a diversi valori di densità di traffico ed il valore di velocità ottimale per entrambi i veicoli.

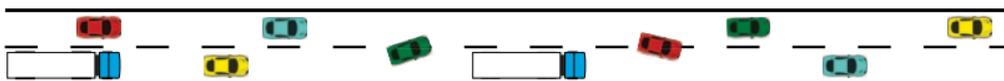


Figura 2.31: The influence of Traffic on Heavy-Duty Vehicle Platoon Formation (2016)

E' di particolare importanza valutare l'opportunità di rallentare il leading vehicle, rallentamento che comporta la formazione di un collo di bottiglia costituito da più veicoli estranei al platoon. Questi infatti devono attendere un gap sufficiente nell'altra corsia per superare il leading vehicle, il platoon non può formarsi però fino a quando tutti questi veicoli non sono riusciti ad effettuare la manovra di sorpasso. Per valutare questi due aspetti, quindi, è fondamentale disporre di strumenti di modellizzazione adeguati e di parametri accuratamente validati mediante field test. Gli autori hanno simulato la manovra appena descritta avvalendosi di server C++ e VISSIM COM, l'impalcatura del sistema è composta dal software VISSIM, da un user input interface, da un vehicle generator ed un vehicle state updater. L'user input interface fornisce al vehicle generator la domanda di traffico e la sua composizione, i parametri che caratterizzano il funzionamento del CACC ed il tempo di durata della simulazione. In funzione di questi input, il vehicle generator e VISSIM aggiornano lo stato dei veicoli variandone le seguenti grandezze: velocità, accelerazione e posizione. Questi passaggi si iterano fino a quando non termina il tempo fissato per la simulazione e gli output vengono immagazzinati nel database. Uno degli scenari analizzati con questo sistema è stato quello di solo catch-up in cui il following vehicle è passato da 80 a 90 km/h ed il leading vehicle ha mantenuto la sua marcia costante ad 80 km/h. Questo approccio è in linea con quanto espresso nei paragrafi precedenti ed evita che si formi una coda eccessivamente lunga dietro al leading vehicle. Si è considerato un distanziamento iniziale dei due veicoli di 3 km che, in una situazione ideale di assenza di traffico, permetterebbe di concludere la manovra in 1080 secondi. In presenza di traffico, però, il following vehicle di cui si è simulato il catch up non è stato in grado a mantenere i 90 km/h in prossimità dei veicoli in coda al leading vehicle. Questa situazione comporta una serie di accelerazioni e decelerazioni del following vehicle, con conseguente aumento dei consumi, e nella simulazione è durata 200 secondi, dopo i quali la manovra di formazione del platoon è stata portata a termine.

Per valutare l'ipotesi di rallentamento del leading vehicle si sono condotte varie simulazioni con l'ipotesi di sole automobili circolanti sul ramo stradale di cui si è fatta variare la densità, la velocità di marcia desiderata ha seguito una distribuzione normale con media di 110 km/h ed una deviazione standard di 8 km/h. Il flusso massimo circolante sul ramo considerato è stato di 1650 veh/h/lane corrispondente ad una densità di 19

veh/km/lane e ad una velocità media pari ad 87 km/h. Oltre questa situazione di picco il deflusso ha subito una rapida diminuzione che ha condotto ad una situazione di congestione in cui i benefici del platoon sono trascurabili, questo caso è stato quindi trascurato e non è stato implementato nelle simulazioni. Gli input su cui si sono delineati gli scenari considerati sono le velocità tenute dai due camion ed i diversi valori di densità del traffico. Per la velocità del leading vehicle si sono considerati come valori 80, 75, 70 km/h, la manovra di formazione del platoon è stata considerata terminata quando tra i due veicoli l'headway è risultato minore di 30 m, senza altri veicoli a fraporsi. I valori così ottenuti sono stati confrontati con la distanza di merging ideale $d_m = \frac{dv_2}{v_2 - v_1}$ con d pari al gap iniziale, v_1 la velocità del leading vehicle e v_2 la velocità del following vehicle. Le densità di traffico che si sono fatte variare in queste simulazioni sono state di 11, 15 e 19 veh/km/lane, si è considerato un tratto di "warm up" di 3 km ed ogni scenario è stato simulato 30 volte. Implementando il valore intermedio di densità di traffico, la distanza necessaria a completare la manovra per i valori di v_1 pari a 70,75 ed 80 km/h risulta incrementata rispettivamente del 46%, 37% e 20%. Gli autori imputano questi valori al collo di bottiglia formato dietro al leading vehicle ed evidenziano come, all'aumentare della differenza di velocità tra le due corsie (imposta dalla velocità ridotta del veicolo pesante), diventi più difficile per i veicoli in coda superare il leading vehicle e liberare la strada al following vehicle. Com'è intuibile, per il valore di 19 veh/km/lane, le simulazioni restituiscono come incremento della distanza necessaria a portare a termine la manovra di formazione del platoon i valori del 66%, 58% e 45%. Nel caso di 11 veh/km/lane, invece, in media questa distanza è aumentata solo del 4-5%. Alla luce di questi risultati e di queste considerazioni gli autori fanno notare come limiti di velocità inferiori sulla seconda corsia comportino, probabilmente, una minore incidenza del rallentamento del leading vehicle e del conseguente collo di bottiglia, questo vuol dire che un modello di ottimizzazione dei consumi utilizzato da un PSP deve tener conto, oltre dei parametri già evidenziati nei paragrafi precedenti, anche della densità di traffico e dei limiti di velocità delle varie corsie prima di decidere se far rallentare il leading vehicle o affidarsi solo al catch up del following vehicle. Anche in questo caso però, senza un opportuno segnalamento presente sui camion dedicati al truck platooning, è possibile che un veicolo esterno si accodi al leading vehicle e non cambi corsia, gli autori nelle conclusioni dell'articolo lasciano l'analisi di questa tematica a lavori futuri, così come

auspiciano l'approfondimento del modello nel caso di limiti di velocità simili tra le corsie. Altri spunti offerti dagli autori: l'impatto che la manovra di formazione del platoon ha sul traffico circostante e l'implementazione del parametro di densità del traffico nei modelli di minimizzazione del consumo di carburante, con analisi del conseguente impatto.

	INPUT	OUTPUT
<i>Ramo stradale simulato [km]</i>	50	
<i>Numero di veicoli che formano il platoon</i>	2	
<i>Numero di corsie modellizzate</i>	2	
<i>Distanza iniziale tra i due camion [km]</i>	3	
<i>Velocità dei camion [km/h]</i>	80	
<i>Velocità di catch up [km/h]</i>	90	
<i>Ritardo nella formazione del platoon, caso di solo catch up [s]</i>		200
<i>Simulazione di formazione del platoon – rallentamento del leading vehicle</i>		
<i>Velocità desiderata delle macchine [km/h]</i>	110	
<i>Deflusso massimo [veh/h/lane]</i>	1650	
<i>Densità massima [veh/h/lane]</i>	19	
<i>Velocità del leading vehicle durante la manovra di merging [km/]</i>	70-75-80	

<i>Densità di traffico considerate [veh/h/lane]</i>	11-15-19	
<i>Numero di simulazioni effettuate per ogni scenario</i>	30	
<i>Headway sotto il quale il platoon si considera formato [m]</i>	30	
<i>Incrementi della distanza necessaria per la manovra di merging – 11 veh/h/lane</i>		4-5%
<i>Incrementi della distanza necessaria per la manovra di merging – 15 veh/h/lane</i>		46-37-20%
<i>Incrementi della distanza necessaria per la manovra di merging – 19 veh/h/lane</i>		66-58-45%

Tabella 2-11: *The influence of Traffic on Heavy-Duty Vehicle Platoon Formation – Liang K., Deng Q., Mårtensson J., Ma X., Johansson K. H.*

2.6.2 Evaluation of Driver Assistive Truck Platooning on Traffic Flow (2015) – Gordon M. M.

Lo studio in oggetto si è concentrato sulla valutazione degli effetti del cooperative adaptive cruise control su veicoli pesanti, modellandone l'implementazione con CORSIM, un software di microsimulazione. Gli obiettivi principali che l'autore si è prefisso, nello stilare questo lavoro di tesi, sono stati: lo sviluppo di un caso baseline con

cui confrontare i risultati, la definizione dei parametri del CACC da utilizzare, valutare gli impatti di tale sistema e confrontarli con il caso baseline. Le simulazioni effettuate ed i dati di traffico utilizzati hanno riguardato una sezione dell'interstate highway 85 nell'area di Auburn-Opelika, nell'effettuare queste simulazioni si sono variati tre parametri: headway, penetrazione del CACC nel mercato dei veicoli pesanti e volume di traffico. Come output misurati per quantificare l'impatto del CACC si sono utilizzati velocità media e diminuzione del tempo di viaggio. La scelta del sito da analizzare nelle simulazioni è ricaduta su un'area prevalentemente rurale, in cui il flusso di traffico fosse prossimo alla capacità dell'infrastruttura ma non fosse completamente congestionato come nelle aree a forte urbanizzazione. Questo ha permesso di quantificare con maggiore precisione i benefici derivanti dal CACC, inoltre nel tratto di strada considerato sono presenti tre uscite che rappresentano potenziali punti di conflitto e permettono di simulare condizioni più attinenti alla realtà delle cose rispetto all'analisi di un segmento isolato in cui il flusso è continuo ed ininterrotto.

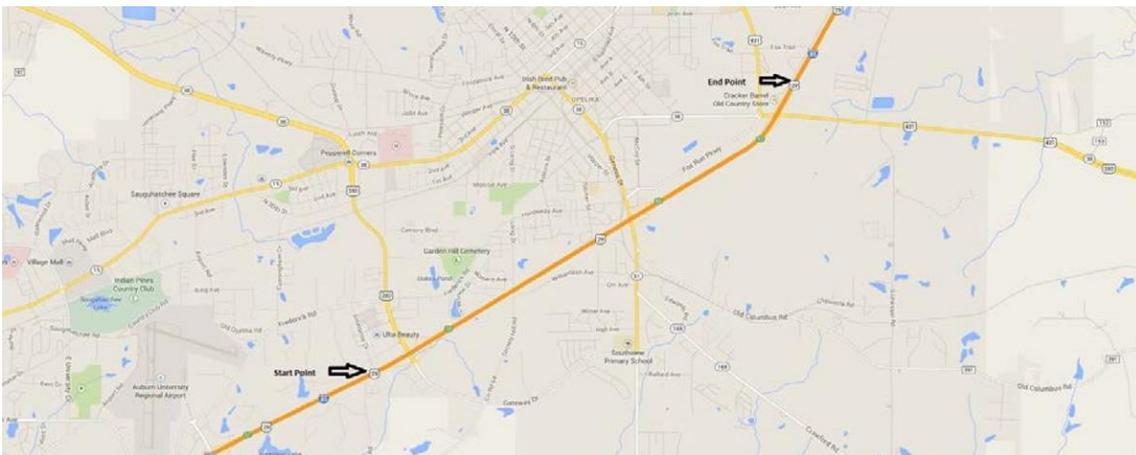


Figura 2.32: I-85 Auburn-Opelika

I valori del flusso di traffico medio e nell'ora di punta sono stati ricavati tramite i dati forniti dall'Alabama Department of Transportation, si rimanda al lavoro in oggetto per un'analisi più approfondita di questo passaggio. Le simulazioni di traffico sviluppate sono basate sull'ora di punta solo su una direzione di marcia, il segmento autostradale è stato modellizzato tramite una serie di nodi e le rampe di uscita e di entrata sono state implementate come "surface nodes". Alle rampe gli input inseriti nel modello sono stati la percentuale di veicoli in uscita o in entrata e la percentuale di veicoli pesanti nel flusso di traffico. Nel caso baseline il comportamento di tutti i veicoli è stato modellizzato con

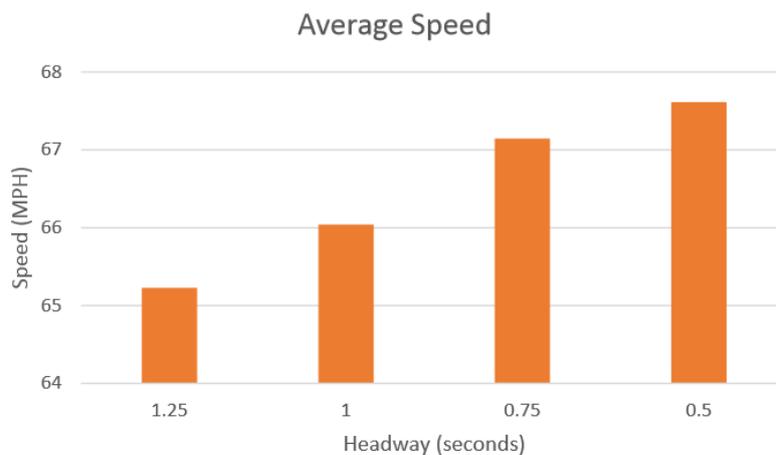
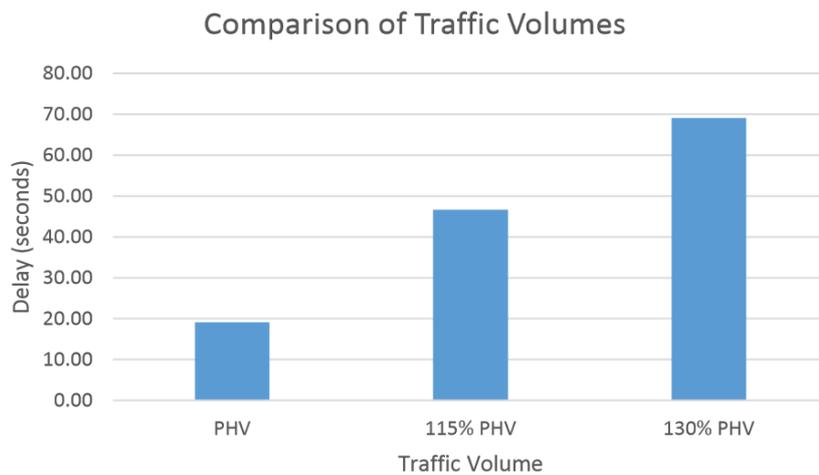
lo stesso car following behavior, il gap temporale mantenuto è per tutti di 1,5 secondi ed ogni veicolo è disposto a seguire il precedente sulla base di un fattore di sensibilità (che varia da conducente a conducente e per il quale CORSIM prevede 10 valori). Il car following model utilizzato è quello dell'università di Pittsburgh che permette di impostare una distanza minima tra i veicoli indipendentemente dalla velocità tenuta da questi.

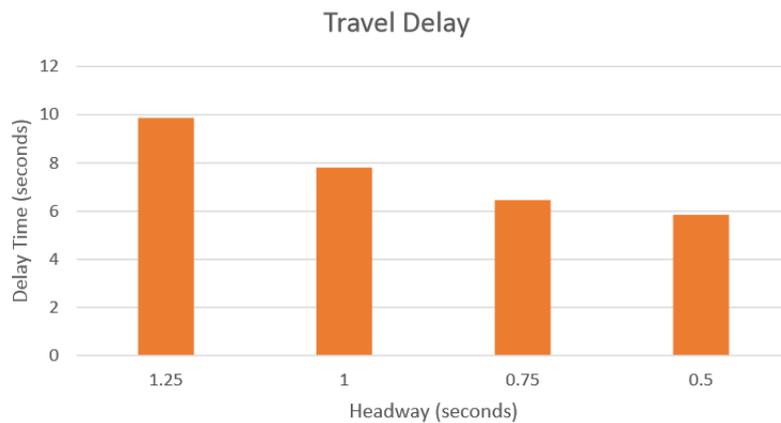
Una volta definito il caso baseline, per simulare la penetrazione nel mercato di veicoli pesanti equipaggiati con CACC il software li ha identificati e ne ha impostato l'headway tenuto al posto del fattore di sensitività, il massimo numero di veicoli formanti un platoon è stato fissato a due, entranti nel segmento simulato già in formazione. Si è quindi ignorato il problema costituito dalla manovra di formazione del platoon. Il motivo per cui si è limitato il numero di veicoli in formazione è costituito dalle rampe, l'autore ha infatti preso in considerazione l'analisi di platoon composti da tre camion ma ha considerato troppo impattante l'interferenza con i veicoli entranti ed uscenti dal ramo stradale. La percentuale di veicoli pesanti è limitata a quella rilevata nelle ore di punta, durante le quali i benefici del CACC sono più rilevanti. Anche il range di comunicazione del CACC non è stato utilizzato come parametro da variare nelle varie simulazioni perché indipendente dalle condizioni di traffico, l'ipotesi di una corsia riservata è stata scartata perché l'I-85 è un ramo stradale composto da due corsie e non si presta a simulazioni del genere. Al termine di queste considerazioni, quindi, gli input che l'autore ha deciso di variare sono stati l'headway tenuto, la penetrazione sul mercato ed il volume di traffico nell'ora di punta, per valutarne gli impatti sugli output della simulazione.

Per l'headway mantenuto si sono simulati quattro valori (1.25 s, 1.00 s, 0.75 s e 0.50 s), la penetrazione del CACC nel mercato dei veicoli pesanti ha assunto cinque diverse percentuali (20,40,60,80 e 100%), vale la pena far notare che per nessuno dei veicoli leggeri si è considerata la possibile presenza del cruise control o di qualsiasi altro equipaggiamento tecnologico. Il flusso di traffico nell'ora di punta è stato impostato pari a quello ottenuto dalle rilevazioni (PHV), pari al 115% di questo valore ed al 130% (quest'ultimo valore costituisce il flusso massimo che l'infrastruttura è in grado di assorbire). Tutti questi valori di input sono stati fatti variare ed hanno costituito sessantatré diverse combinazioni che sono state simulate, ognuna tre volte. Una volta terminate le simulazioni si sono analizzati i risultati per determinare quali avessero un significato statistico, questo è stato fatto tramite uno student's t-test ed un ANOVA

multilivello sulla base della media e della deviazione standard dei risultati. Anche in questo caso si rimanda al lavoro di tesi per approfondimenti sull'argomento, in questa sede si analizzeranno solo i risultati ottenuti per confrontarli con gli output degli altri studi.

Il tempo di viaggio risparmiato in ogni simulazione è stato ricavato sulla base dei ritardi ottenuto su ogni veicolo ed aggregato in un valore unico. All'aumentare del volume di traffico sono maggiori i benefici del CACC e quindi il tempo di viaggio risparmiato che, invece, non risulta molto rilevante in caso di flusso libero o di flusso completamente congestionato (è bene notare come però la tecnologia CACC sia in grado di accelerare il ritorno ad un deflusso regolare). Si riportano alcuni dei risultati restituiti dal modello e ritenuti esplicativi dall'autore, per l'intero set di output si rimanda nuovamente al lavoro di tesi di Gordon M. M.





Market Penetration - 100% Peak Hour Volume

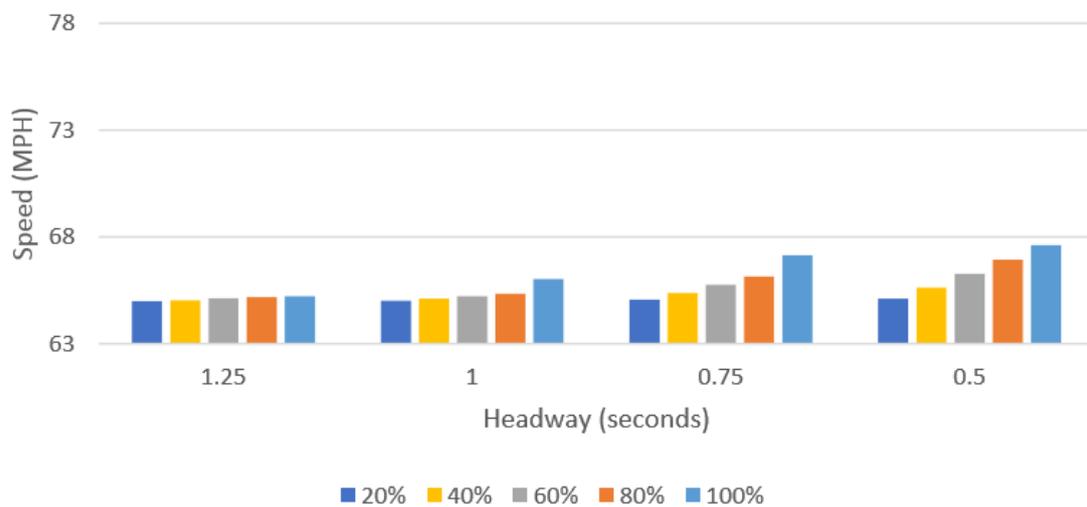


Figura 2.25: Risultati delle simulazioni CORSIM

L'autore ha evidenziato come sussista una relazione tra la velocità media e l'headway del CACC da identificare prima di implementare il truck platooning su strada, inoltre l'incidenza della penetrazione sul mercato sembra essere dipendente dal valore di headway scelto per i veicoli. Al calare dell'headway, maggiore è la penetrazione nel mercato tanto più è maggiore la velocità media, indipendentemente dai volumi di traffico.

Alla luce dei risultati ottenuti l'autore ha concluso che, in generale, la penetrazione del mercato debba essere maggiore del 20% per giustificare l'implementazione su strada e comportare miglioramenti significativi del flusso del traffico. Il valore raccomandato dell'headway iniziale è di 1 secondo, i valori di 0,50 e 0,75 secondi presentano come unica barriera il rapporto con i veicoli a guida tradizionale ed i loro conducenti. Una

raccomandazione presente nei paragrafi finali della tesi è di corroborare con test su strada le simulazioni condotte su CORSIM, nel confrontare simulazioni condotte su tratti di strada diversi è necessario considerare le differenze tra le caratteristiche geometriche dell'infrastruttura, le condizioni meteo prevalenti e la composizione del traffico. Negli spunti per futuri lavori l'autore ha identificato la tematica dell'interazione con i veicoli in entrata ed in uscita alle rampe, ha auspicato un ampliamento delle casistiche simulate e delle categorie di strade analizzate. Si è inoltre auspicato un approfondimento sulla possibilità di riservare una corsia alla guida automatizzata o esclusivamente al truck platooning e su come questo tipo di sistema si adatti a rami più capillari, con maggiori intersezioni e possibilmente anche regolazione semaforica in alcuni punti.

	INPUT	OUTPUT
<i>Ramo stradale simulato [km]</i>	≈8,53	
<i>Numero di veicoli che formano il platoon</i>	2	
<i>Numero di corsie modellizzate</i>	2	
<i>Gap temporale medio tra due veicoli tradizionali [s]</i>	1,5	
<i>Headway garantito dal CACC [s]</i>	1,25-1,00-0,75-0,50	
<i>% di penetrazione del CACC nel mercato dei veicoli pesanti</i>	20-40-60-80-100	
<i>Valori del flusso di traffico simulato in funzione del picco PHV</i>	100-115-130 %	
<i>Numero di simulazioni effettuate</i>	189	

<i>Penetrazione nel mercato minima</i>		20 %
<i>Headway raccomandato [s]</i>		1,00
<i>Allo stato attuale, time travel benefit con headway di 1 s e penetrazione nel mercato del 20% [s]</i>		3,49
<i>Allo stato attuale, velocità media con headway di 1 s e penetrazione nel mercato del 20% [Mph]</i>		65 ⁹

Tabella 2-12: Evaluation of Driver Assistive Truck Platooning on Traffic Flow (2015) – Gordon M. M.

2.6.3 A Multi-layer Control Approach to Truck Platooning: Platoon Cohesion subject to Dynamical Limitations (2017) – Zegers J.C., Semsar-Kazeroon E., Fusco M., Ploeg J.

Oggetto di questo lavoro è la definizione di un approccio multi-layer al CACC volto a migliorare la coesione del platoon, tenendo conto delle capacità meccaniche di accelerazione e decelerazione dei veicoli che lo compongono. **Questo sviluppo è un passo verso la definizione dei vari parametri legati alla trazione che caratterizzano veicoli diversi e che, molto spesso, non vengono implementati nelle modellizzazioni legate alla formazione dei platoon o al risparmio di carburante.** Inoltre ritardi nelle comunicazioni o perdite di connessione in alcuni luoghi della rete possono causare un

⁹ Vale la pena far notare come questo valore sia praticamente uguale a quello di riferimento nel caso baseline, dai risultati si evince come l'headway debba diminuire e la penetrazione del mercato debba aumentare in maniera rilevante per avere scostamenti significativi di questo valore.

comportamento diverso tra i vari veicoli formanti un platoon, le capacità di accelerazioni di un veicolo possono variare anche in base alle tonnellate di carico che questo deve trasportare, rendendo ancora più necessario un approccio come quello oggetto dell'articolo, in grado di garantire string stability. Lo scenario peggiore, se non si considerano le diverse capacità di accelerazione, è costituito da un tratto a forte pendenza che può portare alla dissoluzione del platoon a causa di un headway troppo elevato tra due veicoli, formatosi perché il veicolo in coda non è in grado di accelerare come quello precedente. Nel definire questo approccio multi-layer gli autori hanno, quindi, modificato la comunicazione tra due veicoli accodati in modo che il flusso di informazioni sia bidirezionale e non unidirezionale dal veicolo precedente a quello seguente. In questo modo ogni following vehicle trasmette fino alla testa del platoon le informazioni sulle proprie caratteristiche di trazione e le capacità di accelerazione. Per evitare un'eccessiva complessità e a potenziale interferenza tra i flussi di informazioni, però, si è limitato l'utilizzo delle informazioni così trasmesse da parte del leading vehicle (questo flusso di informazioni appartiene al livello superiore, da qui la definizione di approccio multi-layer). In questo modo, quindi, vengono scambiate informazioni tra i veicoli sulla base di una variabile detta di coordinazione che permette al leading vehicle di essere costantemente aggiornato sulle capacità del platoon e modificare la sua marcia di conseguenza. Nel livello inferiore il flusso di informazioni è unidirezionale e parte dal leading vehicle, comunicando ai following vehicle le istruzioni che devono essere eseguite dal sistema CACC.

Il problema è stato formulato dagli autori come segue. Si è considerato un platoon costituito da n veicoli di cui la dinamica longitudinale è definita dai seguenti parametri:

$$\begin{aligned}\dot{q}_i &= v_i \\ \dot{v}_i &= \frac{1}{m_i + m_{eq}} \left(\frac{\eta_T i_d}{R_w} T_i - C_{rl} v_i^2 - m_i B_{rl} v_i - m_i A_{rl} \cos \alpha - m_i g \sin \alpha \right) \\ \dot{T}_i &= -\frac{1}{\tau_i} T_i + \frac{1}{\tau_i} T_{ref,i}(t - \theta_G)\end{aligned}$$

Nella definizione del problema si è identificato con il pedice i il singolo veicolo facente parte del platoon. q e v rappresentano rispettivamente posizione e velocità, T è la coppia di azionamento, T_{ref} è il valore di T desiderato, τ rappresenta il valore costante del tempo di azionamento, θ_G è il ritardo nell'azionamento, m_i è la massa di questo veicolo i -esimo

ed i tre parametri A_{rl}, B_{rl}, C_{rl} tengono conto della superficie stradale, dell'attrito interno e della resistenza aerodinamica. η_T è l'efficienza degli organi di trasmissione, R_w è il raggio della ruota, g è la costante di gravitazione universale, α è l'inclinazione del tratto stradale ed i_d è il rapporto di trasmissione.

TABLE I
VALUES OF SIMULATION PARAMETERS

Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit
R_w	0.45	m	C_{rl}	1.25	kg/m
i_{axle}	2.5	—	g	9.81	m/s^2
J_w	232	kgm^2	$\tau_i \forall i$	0.1	s
J_e	2.5	kgm^2	θ_G	0.12	s
$T_{max,i} \forall i$	2500	Nm	k_p	0.2	—
η_T	1	—	k_d	0.7	—
$L_i \forall i$	18	m	r	2	m
A_{rl}	0.039	m/s^2	h	0.3	s
B_{rl}	0.0037	$1/s$	θ_C	0.02	s
α	0	rad			

Figura 2.33: Valori assunti nella simulazione

Come si può intuire, anche in base a quanto descritto nei paragrafi precedenti, questo modello cerca di descrivere la dinamica del platoon tenendo conto dei singoli veicoli che lo compongono, non viene quindi reiterata l'ipotesi significativa che vedeva tutti i veicoli simili e tralasciava gli eventuali ritardi di comunicazione. L'unica ipotesi espressa per alleggerire la trattazione, in questo caso, riguarda il valore costante di τ_i , grazie al quale è stato possibile linearizzare la dinamica longitudinale del veicolo. In questo modo il modello non ha tenuto conto delle variazioni funzione del tempo del rapporto di trasmissione e dell'inclinazione del tratto stradale. Un'ulteriore assunzione adottata è che il valore massimo della coppia di azionamento derivante dal motore e dalla coppia di azionamento di ogni veicolo sia sempre disponibile. Questo costituisce un limite sul valore massimo di accelerazione che il veicolo può assumere, tale valore massimo viene confrontato di volta in volta con l'accelerazione obiettivo del platoon ed il modello

permette al veicolo di assumere il più piccolo tra questi due valori. In questo modo però si perde la linearità del modello ottenuta con l'imposizione di un valore costante di τ_i .

Con il supporto di questa modellazione della dinamica longitudinale del veicolo, quindi, gli autori hanno descritto la dinamica del platoon definendo la distanza tra due veicoli consecutivi come $d_i(t) = q_{i-1}(t) - q_i(t) - L_i$ con L_i pari alla lunghezza del veicolo. La regolazione del distanziamento per ogni veicolo, quindi, avviene sulla base di $d_{des,i}(t) = r + hv_i(t)$ dove r ed h sono la distanza di arresto ed il gap temporale desiderato. In questo modo l'errore nel distanziamento è stato definito come $e_i(t) = d_i(t) - d_{des,i}(t)$. Il controller è stato concepito per far sì che tale errore tenda a zero nel tempo e per garantire l'attenuazione della propagazione dei disturbi dal leading vehicle ai following vehicles. Come accennato in precedenza il controller è strutturato su due livelli, il livello inferiore rappresenta il CACC e permette di definire l'accelerazione desiderata per ogni veicolo come segue: $\dot{u}_i = -\frac{1}{h}u_i + \frac{1}{h}(u_{i-1}(t - \theta_C) + k_p e_i + k_d \dot{e}_i)$, nella trattazione gli autori hanno evidenziato come il valore di accelerazione $u_{i-1}(t)$ sia trasmesso tramite comunicazione WIFI e sia, quindi, soggetto a ritardi di trasmissione θ_C .

Nella simulazione condotta dagli autori, si è considerato un platoon di quattro veicoli pesanti, l'unica grandezza a differire tra i camion è stata la massa che comunque ha comportato diversi valori di accelerazione massima. Il tempo necessario al rapporto di trasmissione per adattarsi al cambio di marcia è stato impostato a 1,5 secondi, applicando quindi un valore costante di τ_i . La velocità iniziale a cui si è fatto partire il platoon è stata di 60 km/h in un regime di marcia già regolare, anche in questo caso si è ignorata la tematica costituita dalla formazione del platoon, **resta da valutare oltre quali valori di pendenza sia opportuno rimandare il merging**. A $t = 0$ la velocità obiettivo è stata impostata su un valore di 80 km/h, ne è derivato il seguente comando del cruise controller sull'accelerazione $u_1(t) = k_v(v_{des} - v_1)$. Ciò implica un'accelerazione del leading vehicle calcolata senza tener conto dei limiti costituiti dalla coppia di azionamento massima dei following vehicle. A 5 secondi dall'inizio della simulazione il leading vehicle ha cambiato marcia ed il valore massimo della sua accelerazione è diminuito. Non sono emersi problemi per il secondo ed il terzo veicolo, in quanto più leggeri del primo, mentre invece il quarto veicolo più carico non ha potuto tenere il passo ed $e_4(t)$ è aumentato significativamente. Una volta raggiunti gli 80 km/h dagli altri veicoli, il quarto

camion ha impiegato 45 secondi a recuperare il gap che si era formato. Per evitare questo tipo di comportamento indesiderato del platoon, si è simulata l'implementazione dell'approccio multi-layer e della variabile di coordinazione definita come $\xi_i = \min(\xi_{i+1}, Ky_i)$. Così definita, la variabile di coordinazione viene aggiornata in funzione della massima accelerazione del veicolo più lento del platoon, valore che viene diminuito in funzione di $e_i(t)$ e della sua derivata. In questo modo l'accelerazione desiderata in input al leading vehicle viene determinata con $u_{ref,1} = \min(u_1, a_{max,1}, \xi_2)$. Nella simulazione, quindi, l'accelerazione del leading vehicle è stata limitata in funzione dell'accelerazione massima del veicolo più lento k e l'errore $e_k(t)$ è stato mantenuto pari a zero grazie al termine lineare Ky_i . Questa relazione lineare è stata utilizzata nonostante la non linearità del sistema dovuta all'introduzione del valore massimo della coppia di azionamento, anche in questo modo però i risultati della simulazione hanno restituito un incremento rilevante nella coesione del platoon. Simulando la stessa situazione che ha portato al gap di 45 secondi, ma con l'aggiunta della variabile di coordinazione $\xi_4 = a_{max,4}(v_4) - \gamma_p e_4 - \gamma_d \dot{e}_4$, l'errore spaziale $e_4(t)$ è rimasto molto piccolo. A $t = 10$ secondi, infatti, il quarto camion ha cambiato marcia diminuendo il suo valore di accelerazione, l'errore ha iniziato ad aumentare ma, grazie al contributo negativo di $e_4(t)$ nella formula di ξ_4 , l'accelerazione del leading vehicle è diminuita. Le simulazioni sono quindi state validate dagli autori tramite un esperimento effettuato con auto per ragioni pratiche, non se ne riportano input ed output per evitare di creare confusione tra parametri adatti a veicoli leggeri e parametri invece validi per i camion.

INPUT

<i>Numero di veicoli che formano il platoon</i>	4
<i>Velocità di partenza [km/h]</i>	60
<i>Velocità desiderata [km/h]</i>	80

<i>Crl [kg/m]</i>	1,25
-------------------	------

Tabella 2-13: A Multi-layer Control Approach to Truck Platooning: Platoon Cohesion subject to Dynamical Limitations (2017) – Zegers J.C., Semsar-Kazerooni E., Fusco M., Ploeg J.

2.6.4 Modeling and understanding the implications of future truck technology scenarios for performance-based freight corridor planning (2016) -Smith D. A.

“The topic of autonomous vehicles has been discussed for some time now. While the question in the past has focused on “if”, as in “if this technology will become a reality”, the question has now shifted to “when””

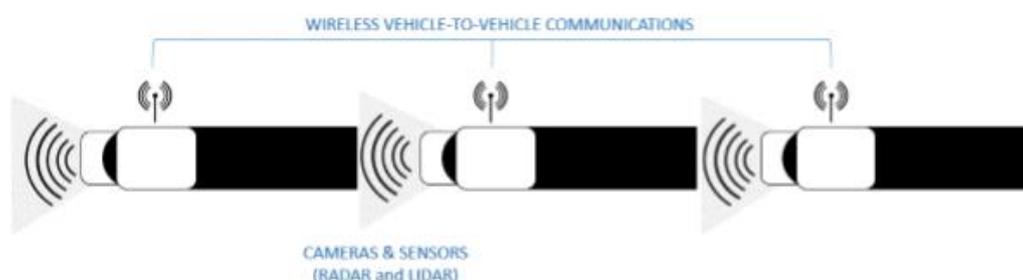


Figura 2.34: Autonomous Truck Platoon

In questa dissertazione l’autrice si è posta, come scopo, quello di sviluppare un modello di simulazione ed uno strumento di misurazione delle performance in grado di considerare la tecnologia del truck platooning. Si sono impostati 14 scenari che sono stati analizzati lungo il corridoio in Georgia composto dalla I-85 e dalla I-285 per quantificare gli impatti del truck platooning da un punto di vista economico, della sicurezza, della congestione e delle emissioni. In questo studio il livello di automazione del platoon sembra attestarsi tra l’L3 e l’L4, il sistema infatti gestisce sia la guida laterale che quella longitudinale ed è ipotizzabile la marcia senza conducente per i following vehicle. Inoltre si sono considerati e confrontati sia scenari comprendenti una corsia dedicata per il truck platooning e la guida automatica, sia scenari di traffico misto con i flussi veicolari a guida tradizionale. Prima di procedere con le varie simulazioni effettuate, quindi, si è caricata la rete stradale

con una matrice OD riferita al 2012 e fornita dal FAF (Freight Analysis Framework), tramite successive interazioni, quindi, si sono determinati i carichi veicolari su ogni ramo e se ne sono calcolati i valori corrispondenti in un orizzonte temporale corrispondente all'anno 2040 (scelto anche in funzione della disponibilità dei dati, oltre che dello sviluppo previsto della tecnologia). E' comunque opportuno rilevare come, nel determinare i costi associati ad ogni ramo per il truck platooning, si siano dovuti considerare nel modello di assegnazione anche i costi di implementazione della tecnologia sui veicoli, i costi ed i benefici legati alla marcia in platooning e la possibile presenza di una corsia riservata. Si riporta allo studio in questione per una dettagliata analisi di questo processo, si evidenzia solo come si sia scelto di analizzare l'ora di punta per il transito dei veicoli pesanti e non quella risultante dal flusso veicolare nel suo complesso. Una volta definito lo stato della rete stradale e del traffico ivi circolante si sono impostati i 14 scenari, 12 dei quali hanno considerato la presenza del truck platooning, in alcuni di questi si è inoltre ipotizzata la presenza di una corsia dedicata su un tratto oculatamente scelto per massimizzarne i benefici derivanti, non si riportano in questo paragrafo i risultati riguardanti l'aggiunta di una corsia dedicata al truck platooning e costruita ex novo perché di difficile realizzazione nella realtà europea, si rimanda allo studio in questione per questo set di output. Un primo dato di input stabilito dall'autrice è la distanza sotto la quale non è considerata conveniente la formazione del platoon, pari a circa 322 km, valore più elevato di quello utilizzato in genere per lo studio del truck platooning sulla rete stradale europea. Nelle simulazioni si sono considerati platoons formati da tre o da cinque veicoli pesanti, ognuno con un conducente a bordo, le potenzialità economiche dei più alti livelli di automazione, in questo senso, si sono valutate solo nelle successive analisi di sensibilità. Una penetrazione del 100% della tecnologia nel mercato è stata scelta come valore di riferimento in tutti gli scenari, ciò ha implicato che, nelle simulazioni, tutti i veicoli pesanti con un tragitto maggiore ai 322 km hanno formato un platoon, quando possibile. Nell'effettuare l'assegnazione dei flussi di traffico, inoltre, l'autrice ha determinato il PCE (Passenger car equivalents) per i veicoli pesanti viaggianti in un platoon, nonostante la scarsa bibliografia al riguardo ha affrontato il problema moltiplicando il coefficiente di equivalenza previsto per camion a guida tradizionale per un valore di 0,46 (determinato in base al minor spazio occupato sull'infrastruttura previsto in [35]). La riduzione del carburante necessario in virtù delle

minori resistenze aerodinamiche è stata valutata pari al 4,3% per il leading vehicle, al 10% per il primo following vehicle ed al 14% per il secondo following vehicle in coda al platoon, valori prevalentemente in linea con quelli riportati in altri studi a differenza della velocità di marcia del platoon posta pari ad 85 km/h. Nel definire lo strumento di misurazione delle performance, quindi, l'autrice ha considerato i diversi output rilevanti nella definizione di suddette performances, di seguito riportati:

- Number of truck-involved crashes
- Number of truck-involved crashes per truck VMT
- Truck operating costs
- Congestion cost for trucking industry
- Peak hour travel time in minutes
- Travel time index: rapporto tra il tempo di viaggio nell'ora di punta e quello sullo stesso tratto ma in condizioni di flusso libero
- Travel time difference between ATP (autonomous truck platooning) trucks and unequipped trucks
- Total truck emissions (nell'ora di punta)
- Trucking industry percent contribution to total emissions
- Percent difference in estimated emissions from an n-truck platoon and emissions from n trucks traveling separately

I primi due output non sono stati quantificati con le simulazioni effettuate, in quanto, nella bibliografia analizzata dall'autrice, non sono stati riscontrati sufficienti dati riguardo l'impatto del truck platooning sulla sicurezza della corrente veicolare nel suo complesso. I costi di esercizio sono stati, invece, quantificati e sono risultati dipendenti dal livello di congestione, dal tipo di camion e dall'utilizzo della tecnologia. A patto di non considerare i costi legati all'acquisto delle componenti tecnologiche i risparmi legati al carburante, in media nelle varie simulazioni, sono pari all'8% per gli autocarri ed al 9% per camion dotati di semirimorchio, meno pesanti e quindi lievemente più efficienti dal punto di vista energetico.

Nel valutare i costi legati alla congestione, l'autrice ha utilizzato il parametro "valore del tempo" in modo da poter quantificare i ritardi e monetizzarli, negli scenari in cui si è ipotizzata una corsia riservata al truck platooning si è avuta una riduzione di questi costi

del 36% per i veicoli dotati di semirimorchi e del 43% per gli autocarri. Sempre riferendosi agli scenari con corsia riservata, il travel time index (il rapporto tra il travel time nell'ora di punta e quello calcolato in condizioni di flusso libero) differisce dell'80% se rapportato ai valori calcolati per il trasporto pesante tradizionale.

Un altro output particolarmente interessante è la differenza percentuale delle emissioni nel caso del truck platooning e nello scenario con lo stesso numero di veicoli pesanti viaggianti singolarmente. Se non si considera la presenza di una corsia dedicata la riduzione percentuale delle emissioni nel caso dei semirimorchi è del 2,4% mentre si assesta attorno al 9,5% per gli autocarri. Nel caso di una corsia dedicata, invece, queste percentuali diventano di circa l'8,3% per i semirimorchi, per gli autocarri si nota una forte riduzione del PM_{2,5} pari all'8,7%, valori del 3,7% per l'NO_x e del 2,6% per i componenti equivalenti al CO₂. L'autrice fa notare, inoltre, come l'introduzione di una corsia dedicata possa favorire uno shift intermodale difficile da quantificare a priori dal modo di trasporto ferroviario, questo può comportare, evidentemente aumento del traffico pesante e delle emissioni ad esso legate. Questo aspetto non è stato approfondito nel lavoro in oggetto ed è una delle limitazioni elencate nelle conclusioni, insieme alle incertezze legate allo sviluppo della tecnologia, ai valori dei parametri di input che si affermeranno ed agli orizzonti temporali di entrata nel mercato. Un'altra semplificazione che per l'autrice merita un approfondimento è l'aver ignorato la presenza di altri veicoli cooperativi o a guida automatica nel flusso di traffico, nonostante gli orizzonti temporali siano simili a quelli ipotizzati per il truck platooning. L'assegnazione dinamica dei flussi di traffico, inoltre, renderebbe più realistico l'approccio trattato ma la scarsità di dati disponibili ha impedito l'utilizzo di questo metodo nelle simulazioni. Altri approfondimenti auspicati nelle conclusioni riguardano la quantificazione del costo dell'ipotesi di corsia dedicata e la sua implementazione negli input, una rete infrastrutturale più ampia di quella considerata fornirebbe risultati più generali, si è inoltre completamente ignorato il problema costituito dalle rampe di ingresso ed in uscita. Un ulteriore sbocco di ricerca ipotizzato è la simulazione di platoons formati da veicoli pesanti alimentati elettricamente e a combustibile fossile. Tutte questi approfondimenti possono cambiare i costi ed i benefici ottenuti come output dal modello analizzato, per il quale, infine si auspica l'utilizzo congiunto con modelli di microsimulazione in grado di considerare le singole manovre e la loro interazione con il traffico tradizionale.

	INPUT	OUTPUT
<i>Orizzonte temporale della simulazione</i>	2040	
<i>Lunghezza del ramo stradale simulato [km]</i>	393	
<i>% dei costi operativi legati al carburante</i>	≈70	
<i>% veicoli pesanti nel flusso di traffico durante l'ora di punta</i>	8	
<i>Distanza minima da percorrere in formazione [km]</i>	322	
<i>Numero di veicoli in un platoon</i>	3 o 5	
<i>% di penetrazione nel mercato della tecnologia</i>	100	
<i>% di spazio occupato rispetto lo stesso numero di veicoli non in formazione</i>	0,54	
<i>PCE (Passenger Car Equivalent)</i>	≈2,1	
<i>V_{platoon} [km/h]</i>	85	
<i>% carburante risparmiato LV-FV-FV</i>		4,3-10-14

<i>% di costi ridotti grazie al minor consumo di carburante ed alla minore occupazione dell'infrastruttura</i>		8% semirimorchio 9% autocarro
<i>% di riduzione dei costi legati al tempo di viaggio sulla corsia dedicata</i>		36 % semirimorchi 43% autocarri
<i>Variazione del Travel Time Index nel caso di truck platooning</i>		0,02
<i>Variazione del Travel Time Index nel caso di truck platooning nella corsia dedicata</i>		0,8
<i>% riduzione emissioni – truck platooning</i>		2,4 semirimorchio ≈9,5 autocarro
<i>% riduzione emissioni – truck platooning & corsia dedicata</i>		≈8,3 semirimorchio 3,7 NO _x autocarro 8,7 PM _{2,5} autocarro 2,6 CO ₂ eq. autocarro

Tabella 2-14: Modeling and understanding the implications of future truck technology scenarios for performance-based freight corridor planning

2.6.5 Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis (2016) –
Deng Q.

“Even though there have been extensive studies on platooning system and corresponding fuel saving, some of the research areas, such as coordination strategies of platooning, platoon operations and the impacts of HDV platooning on traffic flow are still left open. Under a futuristic scenario where a large number of HDVs will be operating in one or several platoons on highway, how to group HDVs into a platoon and how to select spacing policies for HDV platooning are essential for automobile manufacturers, fleet operators and transport planners. Therefore, the formation strategies and operations of HDV platoons, as well as the impacts of HDV platooning on traffic flow have to be carefully investigated.”

Questo lavoro di tesi si è concentrato sulla modellizzazione delle manovre di formazione e disaggregazione del platoon e del loro impatto sulle altre correnti veicolari in funzione della densità di traffico e del tipo di headway considerato. Il platoon di veicoli pesanti è stato definito nel modello come una classe caratterizzata da un certo comportamento di guida, certi regimi di accelerazione e decelerazione ed una regolazione dell’headway mantenuto in funzione di differenti scenari di traffico e caratteristiche dell’infrastruttura.

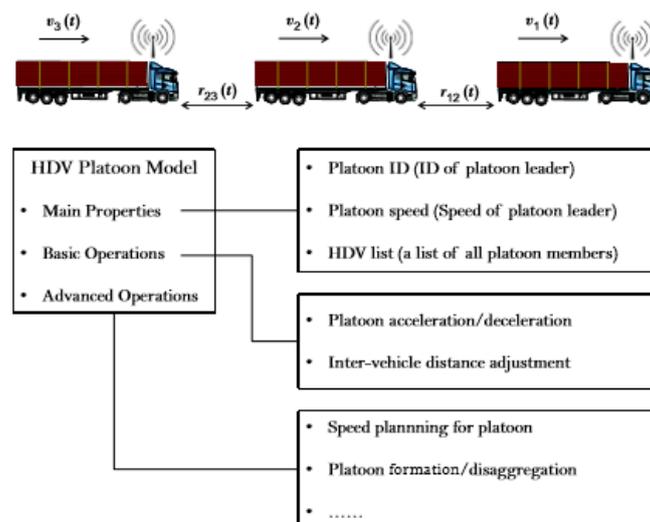


Figura 2.35: Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis (2016) - Deng Q.

Il CACC è stato modellizzato secondo la relazione

$$a_{cacc} = a_1 + k_v(v_1 - v_2) + k_r(r - r_{des})$$

Questa relazione è stata proposta da VanderWerf et al. in “Modeling Effects of Driver Control Assistance Systems on Traffic” (2001). In questa formula entra l’accelerazione del veicolo precedente a_1 che, come illustrato precedentemente discutendo della tecnologia attualmente disponibile, viene trasmessa al veicolo tramite WIFI e permette headway di 0,5 secondi senza minare la string stability. Anche in questo caso l’autore ha tenuto conto della limitata capacità di accelerazione dei veicoli pesanti, considerando per ognuno di loro un valore massimo di decelerazione ed accelerazione (funzione del rapporto tra massima forza di trazione sviluppabile e massa del veicolo).

$$a_{max}(v_2) = \frac{F_{engine}^{max} - F_{air-drag}(v_2) - F_{rolling} - F_{gravity}}{M}$$

Per quantificare $F_{air-drag}$ si è considerato un coefficiente c_D pari a 0,6. Come valore massimo di decelerazione invece, come fattore limitante, si è considerato il comfort dei conducenti che impone un valore di -3 m/s^2 . Anche in questo caso se l’accelerazione necessaria supera il valore massimo di uno dei veicoli sarà quest’ultimo a determinare l’accelerazione finale del platoon.

“Large spacing policy meets safety requirement of HDVs at the cost of decreasing lane capacity; conversely, small desired spacing policy can increase traffic flow rate and reduce air-drag, but it requires strong acceleration and braking capability to maintain safety and control stability”

I limiti della modellizzazione macroscopica attualmente utilizzata, per l’autore, sono costituiti dalla difficoltà di esprimere un headway spaziale come input caratterizzante il flusso del traffico, inoltre è difficile quantificare i massimi benefici del truck platooning sul traffico circostante. E’ per far fronte a queste tematiche che l’autore ha simulato diverse manovre del truck platooning e la loro interazione con il traffico tradizionale, ipotizzando un headway spaziale e temporale in funzione della densità di traffico e delle condizioni di deflusso. Inoltre scopo del presente lavoro di tesi è stato determinare gli impatti del regime di spaziamento adottato sul flusso di traffico, definendolo come input nella relazione velocità-densità di traffico.

Permettere al regime di distanziamento di cambiare da spaziale a temporale e viceversa permette di sfruttare i benefici di entrambi gli approcci, utilizzando il più adatto al flusso di traffico circostante. La definizione di un headway spaziale, infatti, garantisce string stability e stabilità asintotica del platoon, inoltre è facile da implementare e può essere adattata ai vari punti critici dell'infrastruttura (ad esempio in presenza di rampe è possibile imporre un headway maggiore). Utilizzare un regime di distanziamento temporale, invece, permette all'headway di adattarsi alla velocità di marcia del platoon, garantisce stabilità globale del sistema, però, solo in caso di velocità costante. Inoltre come accennato precedentemente, assicura che ogni veicolo assuma gli stessi valori di velocità negli stessi punti, mitigando il problema costituito dai tratti in forte pendenza. Nel modellare il flusso di traffico in regime stazionario per prima cosa l'autore ha identificato i seguenti parametri da utilizzare come input: Percentuale di automobili, lunghezza delle automobili, lunghezza del veicolo pesante (considerando un metro di distanza di sicurezza), il gap temporale tra due automobili, veicoli pesanti a guida tradizionale e leading vehicle. La relazione velocità-densità del flusso di traffico utilizzata è quella del car following model della General Motor's (Gazis et al., 1961), i regimi analizzati sono stati tre: regime di flusso libero, flusso condizionato e congestione.

Nel caso di deflusso libero si è ipotizzato che ogni utente della strada potesse guidare alla velocità desiderata, nel regime di congestione invece si è considerata la stessa velocità di marcia per tutti i veicoli e non si sono considerate le manovre di sorpasso o di cambio corsia. Facendo riferimento ad uno studio precedente (Deng Q., Burghout W., "The Impact of Heavy-Duty Vehicle Platoon Spacing Policy on Traffic Flow" 2015) la relazione velocità-densità utilizzata è stata la seguente:

$$k(1 - P)(L_{car} + v\tau) + kP(L_{HDV} + v\tau) = 1$$

Che si è modificata per tener conto della presenza di truck platooning.

$$k(1 - P)(L_{car} + v\tau) + kP[L_{HDV} + r_{des}(v)] + n[v\tau - r_{des}(v)] = 1$$

In cui $1 \leq n \leq K_p$ rappresenta il numero di platoon formati da veicoli pesanti. E' importante far notare che **il regime di distanziamento adottato dal platoon, in questo modo, è entrato a far parte della relazione velocità-densità**. In questo modo è possibile

determinare la velocità in funzione della densità di traffico e del regime di distanziamento del platoon.

In regime di flusso condizionato si è ipotizzato che i veicoli tradizionali non fossero in grado di mantenere la velocità desiderata a causa dell'interazione con altri veicoli, i camion invece si sono considerati in grado di mantenere la velocità desiderata perché inferiore. L'autore ha evidenziato l'adozione, in questo caso, dell'ipotesi semplificativa per cui la manovra di cambio corsia avvenga in maniera istantanea. Anche in questo caso la relazione velocità-densità utilizzata è stata ripresa dallo studio precedente di Deng Q. e Burghout W.

$$v = \frac{k}{\frac{k(1-P)}{v_{car}} + \frac{kP}{v_{HDV}^{des}}} = \frac{v_{HDV}^{des} v_{car}}{v_{HDV}^{des}(1-P) + v_{car}P}$$

E'importante far notare come l'autore abbia considerato come headway i valori di 0,5 secondi e 3 metri, con questi input è possibile massimizzare i benefici aerodinamici derivanti dal truck platooning, cercando di sfruttare al massimo le possibilità attualmente offerte dalla tecnologia. Utilizzando le relazioni appena descritte l'autore ha determinato come un headway spaziale costante porti ad un miglioramento consistente nella capacità dell'infrastruttura mentre un distanziamento temporale costante presenti performance più elevate nel caso di flusso di traffico molto congestionato. Per cercare di ottenere entrambi i benefici, quindi, l'autore ha formulato un regime di distanziamento misto nella forma di: $r_{des} = \delta_k r_d + (1 - \delta_k) v t_d$ dove δ_k tiene conto della densità del traffico e del regime di marcia. Il livello di densità del traffico per cui si passa dal distanziamento spaziale a quello temporale è dato da

$$k_r = \frac{t_d - r_d \tau + r_d t_d}{P * r_d t_d + (1 - P) r_d \tau + P L_{HDV} t_d + (1 - P) L_{car} t_d}$$

Un simile approccio sposa perfettamente la filosofia di una maggior flessibilità nell'headway che renda il platoon in grado di interfacciarsi con diversi scenari, flussi di traffico e tratti dell'infrastruttura senza rinunciare alla riduzione massima dei consumi, ove possibile.

Una volta definito il comportamento nel platoon nei vari scenari da considerare, nel quinto capitolo della tesi si è simulato l'effetto del truck platooning sul flusso di traffico

tramite l'utilizzo del software VISSIM. Prima di analizzare gli input utilizzati e gli output ottenuti si evidenzia come l'autore abbia previsto più regimi di distanziamento spaziale implementati nel modello per permettere al platoon di assumere diversi headway in funzione della situazione di traffico e dell'infrastruttura.

$$r_{des} = \delta r_0 + (1 - \delta)r_{large}$$

Nella simulazione, quindi, si è modellato un ramo autostradale lungo 3,5 km senza rampe, di questi si è considerato un tratto di warm-up di 0,5 km. Si sono eseguite 30 simulazioni, ognuna di 45 minuti in cui il primo quarto d'ora è stato scartato dai risultati perché utilizzato per caricare l'infrastruttura. Il traffico è composto dal 10% di veicoli pesanti ed al 90% da veicoli tradizionali, per un totale di 1600 veh/h/lane e la velocità desiderata per i veicoli pesanti è stata impostata a 90 km/h. Per i veicoli tradizionali si sono condotte simulazioni per tre valori di velocità desiderata: 110 km/h, 100 km/h, 90 km/h. Il numero di veicoli in un platoon, massimo, è stato impostato a tre, i valori di accelerazioni comunicate dal CACC vengono aggiornati ogni secondo. Come output della simulazione si sono considerati il flusso medio di traffico e di space mean speed, definito come la media delle velocità dei veicoli passanti una sezione durante un determinato periodo di tempo. Quest'ultimo parametro ha restituito un andamento decrescente all'aumentare del numero di veicoli formanti un platoon (questo perché il truck platooning occupa meno spazio sull'infrastruttura e permette il deflusso di un numero maggiore di veicoli, inoltre il valore di velocità desiderata, in questo caso, è inferiore). La percentuale di deflusso del traffico, dato dal prodotto tra space mean speed e densità di traffico, è aumentato all'aumentare del numero di veicoli pesanti coinvolto in un platoon.

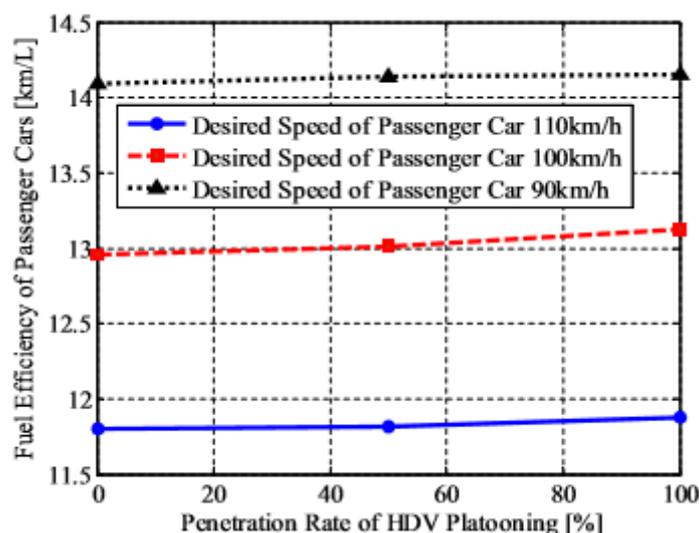


Figura 2.36: Fuel Efficiency of Passenger Car - Penetration Rate of HDV Platooning

Un effetto interessante evidenziato dall'autore è l'impatto benefico del truck platooning sul consumo di carburante delle automobili, probabilmente da attribuirsi alla possibilità che hanno questi veicoli di superare, in un'unica manovra, più camion diminuendo drasticamente il numero di accelerazioni e decelerazioni effettuate.

Si è quindi simulata la manovra di formazione del platoon in funzione del traffico circostante. La distanza iniziale considerata tra i due veicoli pesanti che devono congiungersi è stata impostata a 3 km, gli si è assegnato un valore di velocità pari ad 80 km/h all'inizio della simulazione e le densità di traffico simulate sono state di 11, 15 e 19 veh/h/km (le stesse che si sono considerate quando si è analizzato un paragrafo di questa tesi riguardante la disaggregazione alle rampe). La velocità di catch up del following vehicle è stata impostata a 90 km/h, il platoon si considera formato quando la distanza tra i due veicoli pesanti è inferiore a 30 metri e non è presente nessun veicolo estraneo tra di loro. Le velocità simulate del leading vehicle sono state di 70,75 ed 80 km/h, la simulazione è stata condotta per trenta volte.

Con questi dati in input, senza alcuna interazione col traffico circostante (in un caso, quindi, ideale) la formazione del platoon ha impiegato 0,15 - 0,2 - 0,3 h per avvenire, output funzione della velocità tenuta dal leading vehicle. Lo scenario in cui la densità di traffico è pari a 11 veh/lane/km presenta valori simili, con 15 veh/lane/km, invece, la

formazione del platoon è ritardata del 58,45 e 21% per le velocità tenute dal leading vehicle di 70,75 ed 80 km/h. Per 19 veh/lane/km, in condizione di congestione quindi, il ritardo è pari all'83,72 e 48%, questo andamento decrescente all'aumentare della velocità tenuta dal leading vehicle è attribuibile, come accennato nei paragrafi precedenti, alla mancata formazione di un collo di bottiglia in grado di causare una coda di veicoli tra il leading ed il following vehicle

Nelle conclusioni l'autore ha auspicato un'ulteriore calibrazione e validazione dei parametri entranti nel modello di car following e nella relazione macroscopica velocità-densità. E' anche opportuno introdurre nella modellizzazione del CACC i possibili ritardi di comunicazione per verificarne l'impatto (aspetto che sarà accennato nel prossimo documento esaminato). Si riportano di seguito gli andamenti risultanti dalle simulazioni, la lista degli input utilizzati e degli output ottenuti.

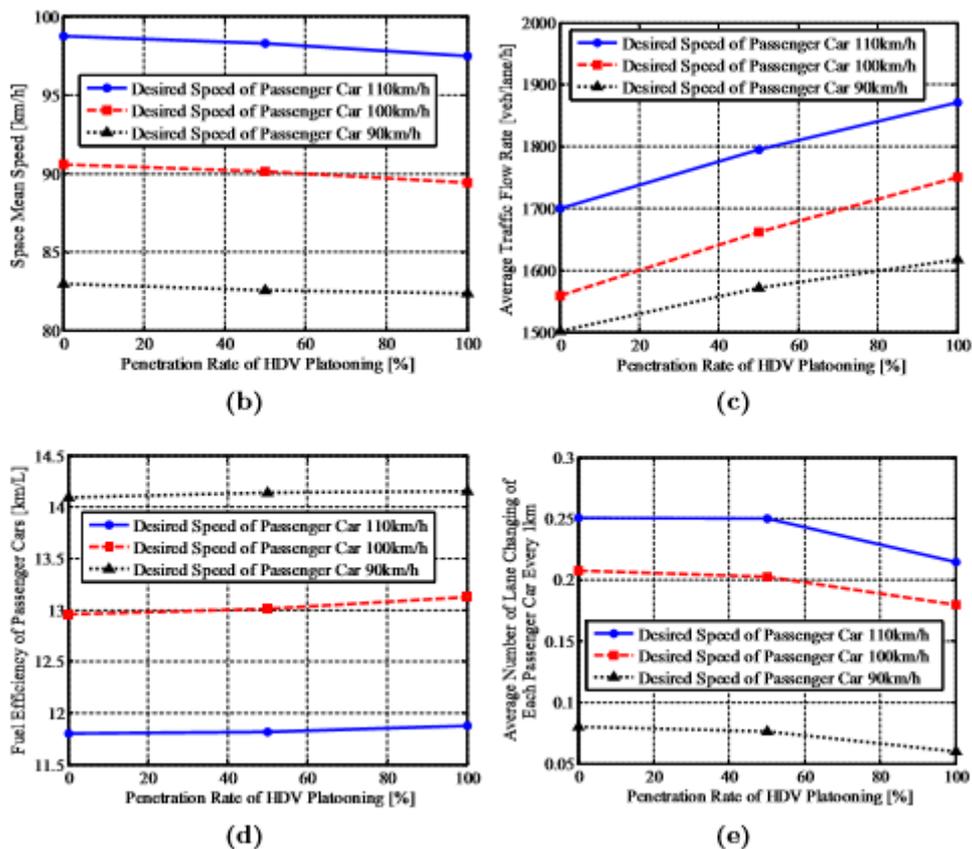


Figura 2.37: Risultati Heavy-Duty vehicle platooning – modeling

	INPUT	OUTPUT
<i>K_v</i>	0,4	
<i>K_r</i>	0,01	
<i>Headway [s]</i>	0,5	
<i>Headway [m]</i>	3	
<i>CD</i>	0,6	
<i>Decelerazione massima [m/s²]</i>	-3	
<i>Simulazioni</i>		
<i>Lunghezza del ramo autostradale [km]</i>	3,5	
<i>Numero di simulazioni effettuate</i>	30	
<i>Durata di ogni simulazione [min]</i>	45	
<i>% veicoli pesanti nel traffico</i>	10	
<i>Flusso [veh/h/lane]</i>	1600	
<i>V desiderata dai veicoli pesanti [km/h]</i>	90	
<i>V desiderata dalle automobili [km/h]</i>	110 – 100 – 90	
<i>Numero massimo di veicoli di cui è composto il platoon</i>	3	
<i>Distanza iniziale tra i due veicoli che devono formare un platoon [km]</i>	3	

<i>Distanza sotto la quale i due veicoli si considerano un platoon [m]</i>	30	
<i>Velocità iniziale dei veicoli pesanti [km/h]</i>	80	
<i>Velocità di catch up [km/h]</i>	90	
<i>Densità di traffico simulate [veh/lane/km]</i>	11 – 15 – 19	
<i>Velocità del leading vehicle [km/h]</i>	70 – 75 – 80	
<i>Tempo necessario alla formazione del platoon in assenza di traffico [h]</i>		0,15 – 0,2 – 0,3
<i>% di ritardo nella manovra dovuti alle velocità del leading vehicle per 11 veh/lane/km</i>		0
<i>% di ritardo nella manovra dovuti alle velocità del leading vehicle per 15 veh/lane/km</i>		58 – 45 – 21
<i>% di ritardo nella manovra dovuti alle velocità del leading vehicle per 19 veh/lane/km</i>		83 – 72 – 48

Tabella 2-15: Heavy-Duty Vehicle Platooning – Modeling and Analysis (2016) – Deng Q.

2.6.6 Truck platooning application (2017) – Ellwanger S., Wohlfarth E.

In questo contributo stilato dalla Daimler per l'Intelligent Vehicles Symposium si sono riportate le considerazioni e le applicazioni pratiche approfondite durante l'European Truck Platooning Challenge. Il primo dato importante che vale la pena evidenziare è il valore di decelerazione massima, imposto anche in questo caso pari a -3m/s^2 , un altro parametro rilevante è il valore massimo di ritardo delle comunicazioni CAM, nel caso peggiore, pari a 0,1 secondo.

Il documento riporta come, nella preparazione del platoon che avrebbe partecipato all'evento, il passo iniziale calcolando la distanza minima tra due veicoli implementabile nell'ipotesi peggiore di fermata brusca del leading vehicle. Il calcolo è stato eseguito con un certo grado di approssimazione, utilizzando un'equazione lineare del moto: $x_{LV} = -\frac{V_0^2}{2a}$ con V_0 pari alla velocità del leading vehicle all'inizio della frenata ed a pari alla sua decelerazione, assunta costante. Per calcolare la posizione del following vehicle oltre la quale è possibile evitare il tamponamento è stato necessario tener conto del ritardo di comunicazione: $x_{FV1} = t_{delay}V_0 - \frac{V_0^2}{2a}$. Sulla base di questi semplici calcoli è stato possibile stabilire che, a 90 km/h (scenario di velocità massima dei veicoli durante la challenge), con un ritardo di 0,1 secondo sono sufficienti 2,5 metri ad evitare l'impatto, questo in una situazione ideale. Nella realtà è stato necessario tener conto di altri due intervalli temporali: il tempo che la decelerazione impiega a giungere al valore massimo di -3 m/s^2 ed il tempo necessario a questo valore di decelerazione per fermare completamente il veicolo.

$$x_{FV1} = t_{delay}V_0 + \left(t_c V_0 + \frac{1}{2} a_c t_c^2 \right) - \frac{(V_0 - a_c t_c)^2}{2a}$$

Gli autori del contributo hanno evidenziato come non sia necessario tener conto di diversi coefficienti di attrito perché si suppone che il platoon guidi su tratti stradali approssimativamente simili. Per il parametro t_c si è utilizzato un valore pari a 0,5 secondi, intervallo considerato sufficiente a quasi tutti i sensori per rilevare la frenata di emergenza. Il valore di a , invece, è stato impostato a -6 m/s^2 , questa scelta è derivata

dall'esperienza Daimler, inoltre la legislazione tedesca impone che ogni veicolo sia in grado di decelerare fino ad un valore di -5 m/s^2 .

Tenendo conto di questi valori standard, il valore non più ideale di distanziamento necessario tra due veicoli pesanti è risultato pari a 7,53 metri. Nonostante ciò, l'headway mantenuto durante la challenge è stato di 15 metri ad 80 km/h per poter contare su un certo margine di sicurezza. Questo distanziamento corrisponde ad un gap temporale pari a 0,675 secondi.

Poiché, però, come accennato, il valore delle decelerazioni massime in più veicoli pesanti può differire è stato necessario determinare a quanto potesse ammontare questa differenza tra leading vehicle e following vehicle perché il valore di headway pari a 15 metri potesse essere comunque sufficiente. La condizione così ottenuta è: $x_{LV} + 15 > x_{FVI}$. La decelerazione del leading vehicle è stata posta funzione della decelerazione del following vehicle ($a_{LV} = \beta a$), inserendo gli stessi parametri utilizzati nei calcoli precedenti si è ottenuto un valore minimo di β pari a 0,883, ciò implica evidentemente che, perché un headway spaziale sia sicuro, è necessario che la decelerazione massima del following vehicle sia almeno pari alla decelerazione massima del leading vehicle.

In questo contributo, inoltre, sono stati riportati anche i valori di tolleranza adottati nel confrontare le misurazioni dei sensori con le informazioni ottenute via WIFI, la velocità deve differire al massimo di 4 km/h, la distanza di 5 metri ed i contorni devono essere perfettamente coincidenti. Se queste misure non hanno riscontro il platoon non può viaggiare in formazione e si disgrega lentamente. E' riportato che i casi principali che hanno portato alla disaggregazione del platoon sono la presenza di rampe e di ponti (in cui il platoon si è disgiunto per non superare il peso massimo per superficie. Una sola volta il platoon si è disgiunto per mancanza del segnale durante la challenge, in una vallata sotto ad un ponte, mentre un'altra volta si è dissolto per un veicolo in panne sulla corsia di emergenza che ha coperto la segnaletica orizzontale.

Dopo l'esperienza della challenge, tra le considerazioni si sono riportati anche alcuni stati da trasmettere potenzialmente utili ma che attualmente mancano nei documenti ETSI (si segnala di un ulteriore documento ETSI in uscita nella prima parte del 2018), questi sono ad esempio un segnale che indichi che il platoon è pronto a ricevere camion in coda o un segnale nel leading vehicle che indichi che i following vehicle sono ancora uniti a lui nel

platoon. Sarebbe inoltre molto utile, secondo gli autori, un segnale che indichi agli altri veicoli pesanti nel platoon la necessità di aumentare l'headway per passare ponti e rampe. Per gli autori, inoltre, sarebbe più funzionale che i veicoli inviino messaggi CAM con un intervallo di 0,1 secondi indipendentemente dalla velocità tenuta o dalla posizione nel platoon, questi messaggi inoltre dovrebbero poter essere inviati anche nel caso di una perdita del segnale GPS che duri meno di 15 secondi, il sistema implementato dalla Daimler dovrebbe comunque essere, secondo gli autori, in grado di predire la posizione dei veicoli per un paio di secondi in caso di perdita di segnale GPS.

	INPUT	OUTPUT
<i>Decelerazione massima [m/s²]</i>	-3	
<i>Ritardo massimo nelle comunicazioni CAM [s]</i>	0,1	
<i>Headway minimo teorico nel caso di fermata improvvisa [m]</i>		2,5
<i>Tempo impiegato dai sensori per rilevare la frenata improvvisa del veicolo precedente [s]</i>	0,5	
<i>Decelerazione massima applicabile [m/s²]</i>	-6	
<i>Headway minimo nel caso di fermata improvvisa [m]</i>		7,53
<i>Headway tenuto durante la challenge [m]</i>	15	

<i>Vplatoon durante la challenge [km/h]</i>	80	
<i>Rapporto minimo tra la decelerazione del following vehicle e del leading vehicle</i>		0,883
<i>Tolleranza nelle misure di velocità tra sensori e DSRC [km/h]</i>	4	
<i>Tolleranza nelle misure dell'headway tra sensori e DSRC [m]</i>	5	

Tabella 2-16: Truck platooning application (2017) – Ellwanger S., Wohlfarth E.

2.7 Interazione tra il platoon e gli altri veicoli

“Putting stripes on the trucks would help identify them as a platoon. Recognition promotes meaningful communication between truck platoon drivers and colleague single truck drivers. A text is helpful, but visual effects are preferable. Drivers going through Germany found their flashing lights to be a useful means of communication with other road users.” (European Truck Platooning Challenge – Lesson Learnt)

In questo paragrafo si analizza uno studio particolarmente interessante perché riguardante una tematica non ancora propriamente affrontata nella bibliografia: la comunicazione tra il platoon ed il traffico circostante. Già nell'European Truck Platooning Challenge, infatti, alcuni conducenti hanno espresso apprezzamenti riguardo l'idea di poter comunicare agli altri veicoli la presenza del platoon e, potenzialmente, anche avvertirli di alcune manovre in procinto di essere intraprese. Anche la Rijkswaterstaat, parte del ministero delle infrastrutture e dell'ambiente Olandese, ha confermato il desiderio, da parte dei

conducenti, di poter utilizzare un sistema di segnalamento esterno. Proprio durante la challenge, inoltre, alcuni veicoli sono stati equipaggiati con bande luminose per evidenziarne la natura di platoon. La possibilità di comunicare con il traffico circostante può, se applicata con criterio, mitigare alcune problematiche come l'interazione con altri camion o la presenza di un veicolo estraneo, accodato al leading vehicle, che ritarda o impedisce la formazione del platoon. Ci si aspetta, inoltre, che una migliore interazione del platoon con il resto del traffico possa migliorare l'accettabilità della nuova tecnologia.

2.7.1 Study of communication needs in interaction between trucks and surrounding traffic in platooning (2017) – Andersson, Jonas, Englund, Cristofer, Voronov, Alexey

“This pre-study project explores the need for external signaling in platoons to avoid any cut-ins from surrounding vehicles whose drivers are unaware that their actions may cause a loss of fuel saving.”

Lo studio in oggetto è lo stesso ripreso nel paragrafo 2.4, in questa sede, quindi, non si ripeteranno i benefici derivanti dal minor numero di cut-in da parte del traffico esterno, si evidenzia solo come un sistema di segnalamento luminoso sul platoon sia potenzialmente in grado di limitarne il numero. Ci si concentrerà, invece, sulle conclusioni tratte dagli autori dopo una campagna di interviste con conducenti esperti. Gli ambiti in cui il bisogno di comunicare sembra maggiore riguardano la traiettoria del platoon e le proprietà dei veicoli che lo compongono, una barriera identificata in questo modo, invece, riguarda la necessità di attrezzare i rimorchi con equipaggiamenti necessari al segnalamento. Questi possono essere utilizzati da diverse compagnie di trasporto e non è chiaro chi debba essere responsabile dei costi aggiuntivi di implementazione e manutenzione. Inoltre i rimorchi ruotano spesso tra diverse motrici, quindi è possibile che in uno o più dei loro viaggi si ritrovino a far parte di un platoon, e debbano possedere tutti gli equipaggiamenti necessari. Un aspetto da approfondire, evidenziato dagli autori, riguarda l'evolversi del comportamento degli altri utenti della strada nei confronti del truck platooning, man mano che la tecnologia prenderà piede nel mercato. Il sistema di

comunicazione tra platoon ed il resto del traffico, dovrà essere principalmente di tipo visivo, almeno nei primi anni dall'implementazione dei sistemi C-ITS fino a quando non si avrà una discreta penetrazione di questi veicoli nel mercato. Nell'identificare cosa fosse necessario comunicare secondo i conducenti di veicoli pesanti, gli autori si sono basati su workshops o interviste telefoniche con i conducenti Di AB Volvo, Iveco, DAF e Scania, su un'intervista con un rappresentante della Peloton e su un'intervista con Richard Bishop, consulente che ha lavorato molto nell'ambito della ricerca dei trasporti americana.

Dal confronto col Booklet Lesson Learnt si mette in evidenza, inoltre, come sussista un potenziale conflitto tra i camion facenti parte del platoon, attenutisi perfettamente al limite di velocità di 80 km/h, e gli altri veicoli pesanti che molto spesso non hanno accettato questo regime di marcia ed hanno tentato di eseguire manovre di sorpasso più aggressive ed in numero maggiore, molte di queste manovre però sono state interrotte una volta realizzata la totale lunghezza del platoon. Altri veicoli pesanti invece si sono accodati al platoon senza rendersi conto della reale natura del sistema, è intuibile come un ulteriore veicolo in coda al platoon ne aumenti l'incidenza in punti critici come le rampe, inoltre può inibire la manovra di dissoluzione rendendola più lunga del previsto (questi veicoli, infatti, anche se non mantengono headway limitati come quelli garantiti dal CACC, tendono a viaggiare a distanze limitate dall'ultimo following vehicle). L'implementazione di un sistema di segnalamento in grado di comunicare con questi veicoli, quindi, può potenzialmente limitare il numero di interazioni indesiderate

Gli autori hanno identificato i principali scenari in cui il segnalamento tra truck platooning e traffico circostante può risultare utile: in prossimità di rampe di uscita e di entrata, in caso di veicoli in coda desiderosi di superare il platoon ed in prossimità di cantieri stradali in cui una o più corsie risultano inibite al traffico. Si riporta in seguito la tabella completa delle informazioni valide da trasmettere, ricavate dalle interviste di cui sopra.

Communication needs	Corresponding information
Cruising	
Need to say "We are a platoon" (generic)	The platoon companions show that they are together and drive as one unit
Need to know if you can trust a new platoon companion and to communicate that you are trustworthy	The joining platoon companion communicate its status and performance
On- and Off-ramp	
Need to communicate when it is necessary for one vehicle or the whole platoon to change lanes	The platoon uniformly communicates its intention to change lanes
Need to show when and how to adapt speed to oncoming traffic	The platoon show that it has recognized the oncoming traffic and early show its intended maneuver
Need to communicate which vehicle in the platoon will give way to oncoming traffic	The vehicle shows that it has recognized the oncoming traffic and early show its intended maneuver
Need to tell how to adapt vehicle speed, gaps and position to facilitate weaving with oncoming traffic	The platoon companions indicate its intention to open gap or not
Need to for the oncoming vehicle to sync speed	The platoon indicate its relative speed to the oncoming traffic
Need for the oncoming vehicle to tell that "I expect you to let me in"	The oncoming vehicle communicates its presence, intention and request to join the highway
Overtaking	
Need to communicate time and distance to next off-ramp	The platoon communicates the distance and time to the next off-ramp to aid overtaking decisions
Need to know intention if other vehicle wants to cut-in (to let cars by).	The overtaking truck communicate its intention to let cars from behind pass
Roadwork	
Need to have a lead vehicle driver that is vigilant and can change lane in time when needed.	The lead vehicle indicate its intention to change lane (if uniform lane change, await acknowledgement from companions)

Figura 2.38: Comunicazione platoon - traffico circostante

Alcune di queste informazioni sono troppo complesse da trasmettere via segnalamento luminoso sui veicoli, presentano però grandi potenzialità in uno scenario in cui il platoon risulta circondato da una buona percentuale di veicoli cooperativi. Gli autori hanno riportato, inoltre, le osservazioni di DAF ed Iveco, il numero di interferenze del traffico circostante sul platoon, ad esempio, è risultato approssimativamente pari a 10-20 volte al giorno. Nessuna di questa, comunque, ha comportato problematiche per i vari platoon che sono stati in grado di regolare il loro headway senza ulteriori problemi. Richard Bishop ha evidenziato come una penetrazione dei sistemi V2V nel mercato possa svolgere una funzione analoga al segnalamento luminoso, inoltre ha ipotizzato che la prima generazione di truck platooning si limiti all'impiego di due veicoli in formazione, per evitare tutti i possibili problemi legati alle rampe. Una considerazione importante che gli autori esprimono al termine dell'analisi delle varie possibili interazioni con il traffico circostante è che, potenzialmente, una flessibilità maggiore nella gestione di queste interazioni nelle varie situazioni non può che rendere più facile l'implementazione del truck platooning e che, tale flessibilità, può essere assicurata da una più efficiente comunicazione. Nelle conclusioni del lavoro, gli

autori hanno indicato gli ambiti di ricerca che dovrebbero essere approfonditi, questi sono: l'evoluzione del comportamento degli altri conducenti nei confronti di un truck platoon nel tempo, come questo cambia all'aumentare del numero di veicoli nel platoon. Inoltre viene auspicato un riscontro con dati risultanti da studi naturalistici anche in Europa, come avvenuto in America, per rendere più chiaro quanto sia necessario introdurre un sistema di segnalamento e quali informazioni debbano essere trasmesse in questo modo.

2.8 Definizione dello scenario attuale

Scopo dei paragrafi precedenti è stato evidenziare quali sono gli approcci più comuni adottati per far fronte alle tematiche ancora aperte sul fronte del truck platooning. In questo paragrafo si vuole, quindi, mettere insieme quanto visto e confrontato nella bibliografia analizzata per definire un quadro abbastanza consolidato da cui partire per modellare nuovi scenari, organizzare test su strada o impostare un nuovo lavoro di ricerca. **Non ci si limiterà, quindi, ad un commento sui risultati riportati nei singoli studi settoriali ma si metteranno insieme queste singole realtà per definire in modo più oculato possibile uno scenario di riferimento che tenga conto di tutto ciò che è consolidato e delle tematiche ancora aperte.** Molto spesso, infatti, ci si è trovati ad analizzare studi riferiti ad aree geografiche e realtà differenti, ove non è possibile quindi definire un valore preciso se ne indicherà il range di variazione riscontrato cercando di evidenziare da cosa dipende quel determinato parametro e perché non si è ancora giunti ad un valore condiviso. Non si può che evidenziare di nuovo la necessità di poter disporre di un quadro generale che permetta di impostare studi generali su costi e benefici del truck platooning, studi modellistici su tratti caratteristici dell'infrastruttura ed analisi delle criticità ancora aperte per non trovarsi a dover affrontare tematiche prevedibili il giorno seguente l'entrata nel mercato di questo nuovo sistema di trasporto. Non si ha la presunzione di aver individuato tutte le problematiche o di aver analizzato tutti gli studi disponibili in materia, **si può dire però di aver effettuato un'analisi critica sufficientemente esaustiva in ognuno degli ambiti del truck platooning che ancora costituiscono una realtà mutevole.** Per definire una situazione quanto più realistica

possibile, per prima cosa, è necessario caratterizzare il platoon tipico formato da veicoli pesanti, evidenziando quali sono i parametri più consolidati in bibliografia e quali, invece, possono variare in funzione del tipo di applicazione ipotizzata o di regione europea presa in considerazione. Un valore ricorrente negli studi è la velocità di marcia del platoon, pari ad 80 km/h, la velocità massima consentita è di 90 km/h (questi valori, oltre a trovare riscontro nella maggior parte delle legislazioni europee, assicurano che la maggior resistenza da superare sia quella aerodinamica e non quella di rotolamento, inalterata nel platooning). L'headway tra i veicoli oscilla molto di più come valore, la tecnologia attuale permette di mantenere un headway temporale pari a 0,5 secondi in condizioni di sicurezza, nella realtà però molti degli studi presenti in bibliografia tendono ad utilizzare un valore più vicino all'unità nelle simulazioni. Bisogna tener presente come, alle velocità ipotizzate, gap temporali inferiori a 0,7 secondi rendano nervosi i conducenti meno esperti, sotto i 0,3 secondi la sensazione può diventare di pericolo imminente, questa però è una tematica che nel breve periodo non sembra rilevante e nel medio pericolo può essere affrontata con una maggior accettazione della tecnologia e corsi di addestramento per i conducenti. Come accennato nei paragrafi precedenti, inoltre, in alcune regioni europee il valore di 0,8 secondi non è risultato sufficiente ad impedire il cut-in di veicoli esterni al platoon, è da valutare però l'incidenza di tale fenomeno con valori di headway inferiori. La maggior parte degli studi che hanno considerato un headway spaziale, invece, ha preso a riferimento valori di 10 metri tra un veicolo e l'altro che, ad 80 km/h, implicano gap temporali di circa 0,45 secondi. Nella scelta dell'headway, quindi, bisogna tener conto di molteplici fattori quali l'accettabilità da parte della maggior parte dei conducenti, la propensione regionale al cut-in e la presenza di rampe sul percorso previsto ed il loro numero, è fondamentale aver sempre presente, inoltre, qual è il tempo necessario a disaggregare un platoon in base all'headway di partenza. E' anche raccomandabile che tale valore venga regolato in funzione del tratto percorso dal platoon in quel momento e delle condizioni del traffico circostante, una maggior flessibilità in questo senso permette di utilizzare valori più ridotti di headway in gran parte del viaggio e di garantire gli spazi necessari agli altri veicoli per imboccare le rampe di uscita o per immettersi dalle rampe di entrata. Allo stato attuale è possibile affermare che l'headway temporale tende ad assumere nella bibliografia valori compresi tra 0,5 s ed 1 s mentre l'headway spaziale si concentra attorno valori prossimi ai 10 metri, evidentemente più ridotto è questo valore

maggiori sono i benefici sulle emissioni derivanti dal truck platooning, una maggior flessibilità del sistema quindi permette al platoon di massimizzare i benefici ove possibile senza entrare in conflitto con le altre correnti di traffico o con la percezione del rischio dei conducenti.

Anche dare una stima della riduzione delle emissioni può essere complicato in quanto fortemente dipendenti dalla collocazione geografica, dalla densità dell'aria, dall'headway del platoon (variabile) e della velocità mantenuta da questo. Dall'analisi della bibliografia analizzata, comunque, si è cercato di derivare una percentuale di carburante più circoscritta rispetto ai valori compresi tra il 5 ed il 20% [36] attualmente reperibili in letteratura. La maggior parte degli studi analizzati ha assunto una riduzione della resistenza aerodinamica pari al 10%, questo valore è stato identificato, in genere, come il risultato della media delle riduzioni diverse dell'air drag che avvengono in tre veicoli formanti un platoon. Bisogna tener presente, infatti che il leading vehicle, non subisce gli stessi vantaggi degli altri e che all'aumentare del numero di veicoli in un platoon i vantaggi per i following vehicle aggiuntivi tendono ad assestarsi ad un valore asintotico (Zabat et al. [72]). Si evidenzia però la necessità di eseguire diversi field test in diverse regioni geografiche della comunità europea, in modo da poter ottenere un valore il quanto più preciso possibile che possa costituire un input affidabile per l'impostazione di un business case adeguato. La tematica dei field test è soggetta alle diverse legislazioni nazionali, si riporta come in Italia non esista ancora un insieme di procedure che regoli i documenti necessari e le tempistiche previste per ottenere il via nell'effettuare test di guida semi-automatica su strade pubbliche (il conducente deve essere responsabile della marcia del veicolo in ogni istante). E' da valutare, inoltre, la possibilità di effettuare diversi test su territorio privato che ignorino le interazioni con il traffico circostante ma possano quantificare i benefici sulle emissioni derivanti da diversi headway in condizioni di flusso libero non condizionato, dalla bibliografia analizzata infatti non è emerso un valore di headway preciso sotto il quale i benefici aerodinamici diminuiscano o si assestino.

La tematica della ripartizione in modo equo dei benefici derivanti dal truck platooning può trovare due approcci risolutivi nel breve e medio periodo: mono-brand platooning o utilizzo di un PSP. Nel primo caso tutti i veicoli appartengono alla stessa compagnia che quindi beneficia di tutti i risparmi di carburante, nel secondo caso invece è compito del

service provider ripartire questi benefici tra i partecipanti, il modo in cui questo accada non è ancora definito a causa della mancanza di un business case dettagliato del servizio. Si ribadiscono, inoltre, le potenzialità in questo senso costituite nel breve periodo di un approccio incentrato sull'utilizzo di controllers come esposto nel paragrafo 2.4.3. La maggior parte degli studi analizzati è partito dal valore medio del 10% di riduzione dei consumi per platoon ed ha quantificato in seguito i benefici derivanti dalla coordinazione fornita da un PSP. In linea di massima per aumentare l'affidabilità di queste stime e porre le basi per la definizione di un business case condiviso, bisogna approfondire gli aspetti spesso semplificati. Si tratta quindi di implementare in questi modelli di ottimizzazione le pendenze variabili di diversi tratti di infrastruttura, il numero di cut-ins, le manovre di disaggregazione e formazione in funzione della densità del traffico ed un parco veicolare che possa schematizzare situazioni che vadano oltre i confini di una singola nazione. Inoltre è necessario considerare le diverse caratteristiche meccaniche di ognuno dei veicoli in formazione (soprattutto nel caso di platoon comprendenti veicoli di più imprese diverse) ed i tempi di riposo da assicurare ai conducenti. Molti di questi ambiti sono stati approfonditi separatamente in uno studio dedicato, manca però un modello che tenga conto di tutti questi fattori.

Anche il numero di veicoli che possono comporre il platoon è una tematica ancora aperta, nella maggior parte delle sperimentazioni su strada analizzate il numero varia da due a tre. Questi valori sono in linea con le previsioni dei principali stakeholders in un orizzonte temporale di qualche anno e permettono di limitare il numero e l'incidenza di problematiche come il truck platooning alle rampe, l'impatto delle manovre di merging e di disaggregazione e l'impatto della tecnologia sugli altri utenti della strada. E' però necessario evidenziare come queste considerazioni siano dipendenti dal caso applicativo analizzato, in alcune realtà dedicate o protette può essere limitativo fissare un numero massimo di tre veicoli pesanti. Scania, ad esempio, nel 2017 ha avviato una sperimentazione in concerto con Toyota e l'autorità portuale del porto di Singapore in cui testare truck platoons composti da quattro veicoli (in cui, tra l'altro, i following vehicle sono a guida automatica) [84]. In questo caso, infatti, il tragitto previsto collega i diversi terminali del porto, pur attraversando strade pubbliche. Un'applicazione del genere, in una realtà fortemente dedicata al trasporto merci, non deve quindi limitarsi a convogli di due o tre veicoli pesanti ma deve poter sfruttare al massimo le potenzialità offerte da

questa tecnologia. L'interesse di Scania per questo tipo di applicazioni, inoltre, mette in risalto come l'applicazione del truck platooning non sia confinata a realtà transfrontaliere ma possa trovare sbocchi anche in scenari di movimentazione delle merci e gestione degli snodi commerciali. L'utilizzo del truck platooning per la movimentazione di container tra terminal, infatti, non usufruisce delle riduzioni aerodinamiche a causa delle più basse velocità in gioco. E' intuibile però come un business case favorevole possa emergere qualora sia permesso l'utilizzo di following vehicle privi di conducente [35], è bene che sperimentazioni in questo senso vengano condotte in realtà protette come quelle dei terminal.

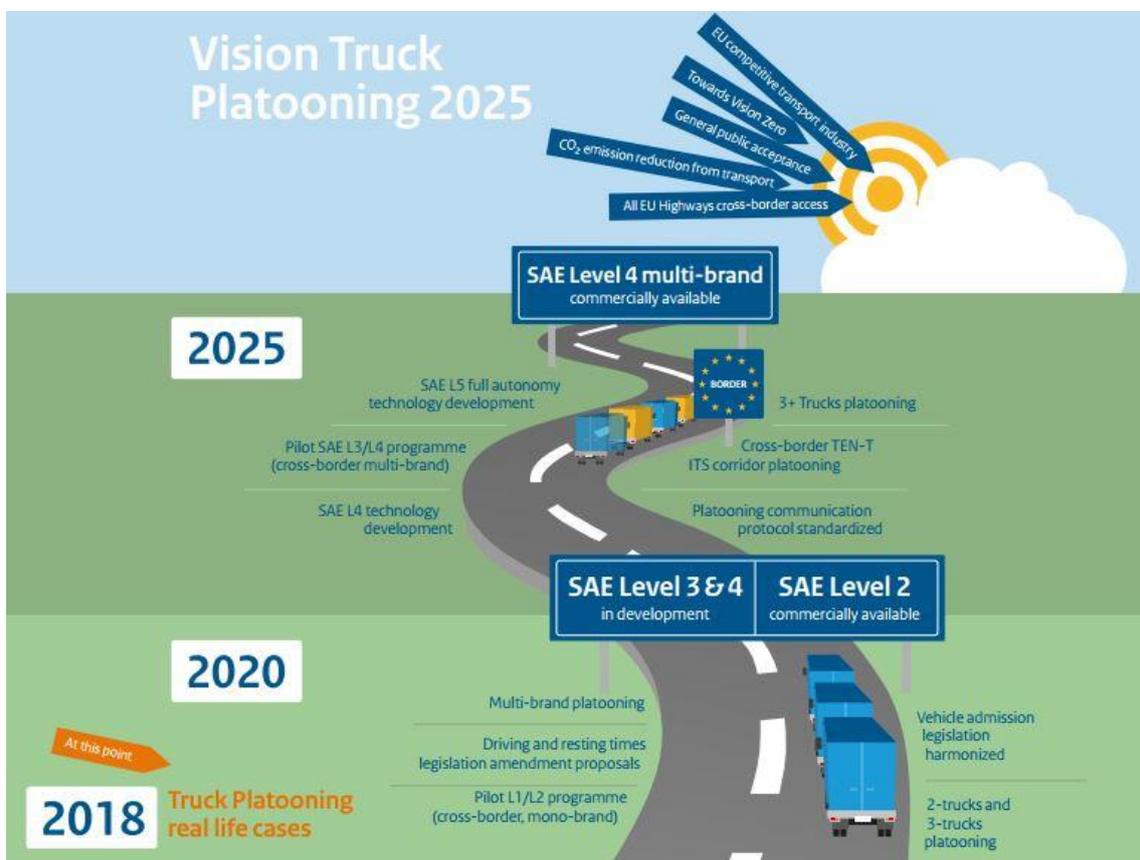


Figura 2.39: European Real Life Cases Truck Platooning, 2017-2019 – Rijkswaterstaat

Potenzialmente non c'è un limite al numero dei veicoli che possono formare un platoon, soprattutto quando si ipotizza un'allocazione dinamica delle corsie o un qualsiasi altro tipo di separazione del flusso dal resto del traffico, bisogna tener conto, però, di come la durata della manovra di disaggregazione sia fortemente dipendente dal numero di veicoli

in formazione e di come, agli stadi iniziali della tecnologia, il conducente del leading vehicle debba aver sempre un'idea dello spazio occupato dal platoon sull'infrastruttura. Anche in questo caso, inoltre, le differenze tra le varie nazioni hanno un loro peso, due dei conducenti che hanno partecipato all'ETPC, ad esempio, hanno riportato nelle loro considerazioni come le rampe in Germania siano troppo corte per ospitare un platoon. In Germania, in effetti, la lunghezza media delle rampe di immissione è di 250 m a fronte dei 400 m delle rampe svedesi.

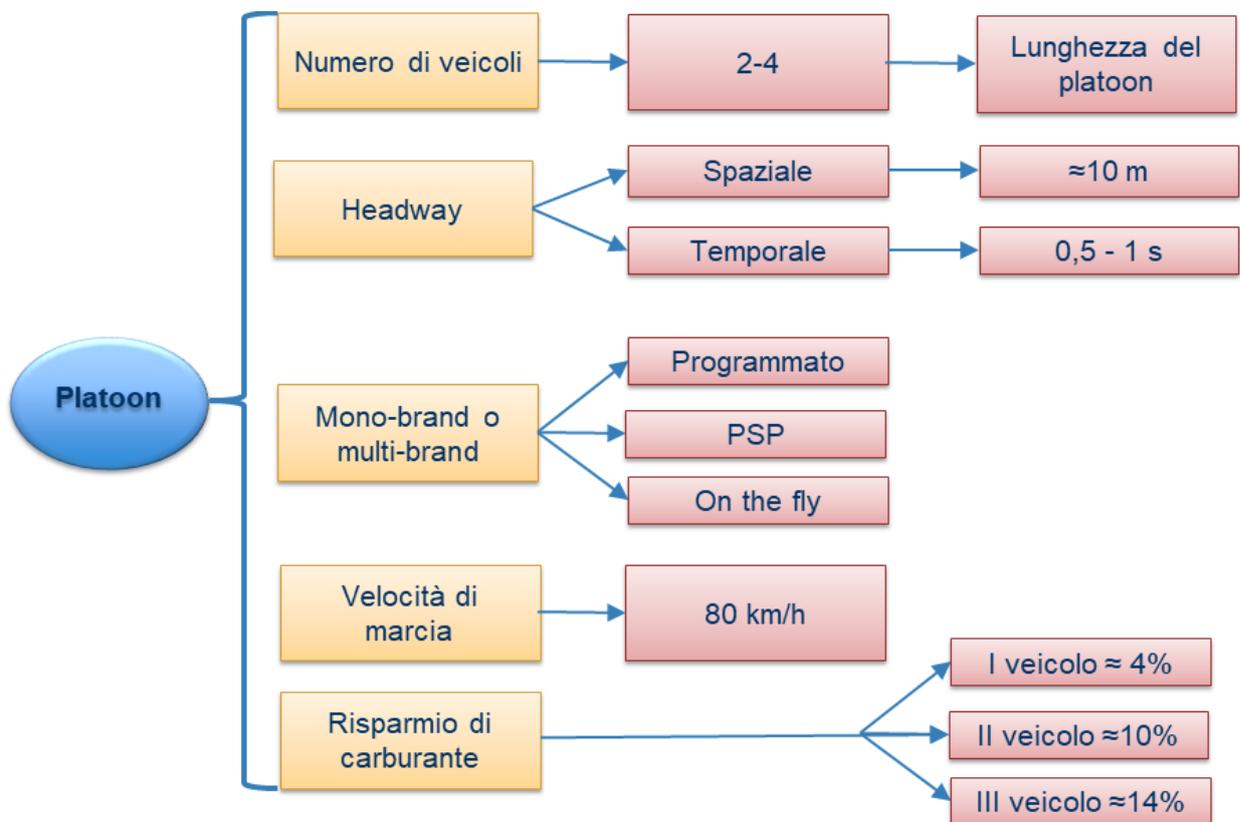


Figura 2.40: Platoon - parametri caratteristici

Ci si sofferma quindi brevemente sulla formazione del platoon “on the fly”, con questo termine si definisce la possibilità che due veicoli pesanti formino un platoon dopo essersi incontrati spontaneamente lungo il tratto stradale. Non si ipotizza più, quindi, un service provider che a livello superiore coordina e programma i punti di incontro e le tempistiche ma si sfrutta una penetrazione nel mercato della tecnologia tale che qualsiasi veicolo

equipaggiato possa accodarsi ad un altro in qualsiasi momento. Questo tipo di soluzione non è evidentemente adottabile sin dal primo giorno di entrata nel mercato della tecnologia ma è ipotizzabile in un orizzonte temporale più ampio, in cui il parco veicolare dedicato al truck platooning sia cresciuto a tal punto che sia possibile affidare al caso il punto di incontro.

Una volta che è stato definito il più precisamente possibile il platoon come elemento modulare del flusso di traffico, si può procedere ad analizzarne le interazioni con gli altri flussi veicolari, gli impatti delle manovre di formazione e disaggregazione sul traffico e le distanze necessarie ad effettuarle, le interferenze nei punti critici dell'infrastruttura come le rampe di entrata e di uscita e gli impatti che il deflusso condizionato su alcuni rami stradali può avere sulle riduzioni dei consumi e delle emissioni.

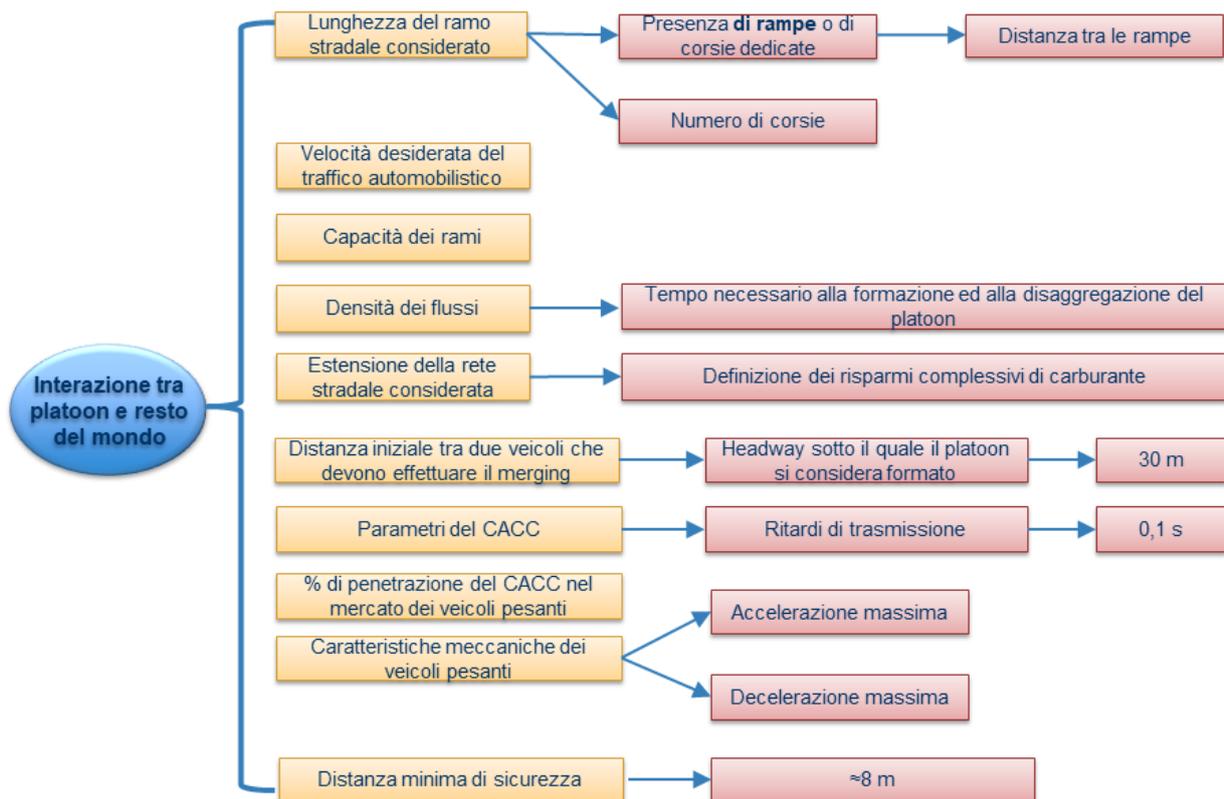


Figura 2.41: Platoon - parametri caratteristici 2

Dalla bibliografia analizzata emerge come la percentuale di penetrazione nel mercato della tecnologia spesso ipotizzata si assesti attorno ad un valore del 10%, soprattutto nei casi in cui deve essere giustificata l'implementazione di un service provider. Quasi tutti gli scenari considerati e simulati hanno preso in considerazione un tratto di infrastruttura principale, si è rimandato a studi futuri il compito di determinare l'impatto del truck platooning su strade rurali o secondarie.

E' da evidenziare, ancora una volta, come il truck platooning sia una tematica innovativa ed in continua evoluzione, difficilmente caratterizzabile con parametri univoci a causa della sua natura transfrontaliera, dei diversi stadi delle legislazioni nei vari paesi, della mancanza di un caso di applicazione pratica che preveda un service provider e della forte dipendenza dal traffico circostante dei benefici economici legati al risparmio di carburante. Forse il punto più consolidato è costituito proprio dalla tecnologia che garantisce, allo stato attuale, prestazioni più elevate di quelle permesse dallo schema normativo e dall'accettabilità degli altri utenti della strada nei confronti del truck platooning, le direzioni in cui è necessario proseguire con le attività di ricerca non sembrano riguardare quindi gli equipaggiamenti tecnologici quanto, più che altro, tematiche trasportistiche. Nella bibliografia esaminata, ad esempio, molti testi auspicano un approfondimento per quanto riguarda le seguenti tematiche:

- “Wall of trucks”, l'ingombro costituito dal platoon di camion e come questo impatti sulle manovre di cambio di corsia, di uscita e di entrata nel tratto stradale.
- Ampliamento del numero di veicoli in input alle simulazioni condotte, molte delle quali hanno riguardato realtà circoscritte ed al più nazionali, viene considerata utile, inoltre, una maggiore estensione della rete analizzata.
- La realtà del truck platooning, almeno nel primo periodo dall'entrata sul mercato, riguarderà tratti di infrastruttura principali (quelli che in effetti presentano il maggior numero di possibilità di formazione di un platoon) viene lasciato a future ricerche il compito di valutare gli impatti del truck platooning su strade rurali o comunque di minor importanza e si rimandano tematiche quali l'ultimo miglio o l'attraversamento di un tessuto urbano, allo stesso modo l'interazione tra un platoon di camion ed una rotatoria non è ancora stata approfondita, così come non si è trattato in maniera esaustiva il rapporto con le intersezioni semaforizzate.

- Possibilità di riservare una corsia, anche in modo dinamico, al truck platooning e gli impatti che questo può avere sul traffico tradizionale, un'ipotesi del genere deve essere accompagnata da un'analisi costi benefici e da simulazioni microscopiche nei punti di conflitto quali ad esempio le rampe.
- Ore notturne, come possono cambiare i platoon quando il traffico è più limitato, non è difficile ipotizzare ad esempio che il numero di veicoli in formazione possa superare il numero quattro in scenari del genere.
- Calibrazione degli input implementati nei modelli con test su strada, non solo su spazi privati ma su strade pubbliche per analizzare le interazioni con il traffico tradizionale. In questo campo sono poche le nazioni all'avanguardia ad aver definito un code of practice (come l'Inghilterra [20]) o ad aver inserito le norme necessarie nella propria legislazione dopo l'European Truck Platooning Challenge (come l'Olanda). L'Italia non fa da apripista, in quanto ogni progetto di guida semi-automatica o automatica su strade pubbliche al momento deve ottenere una deroga, i documenti necessari per ottenerla però non sono elencati in alcuna norma né sono previste tempistiche certe.
- Implementazione dei possibili ritardi di comunicazione e verifica della robustezza del sistema nei casi prevedibili peggiori, come ad esempio in gallerie particolarmente lunghe o vallate particolarmente strette.
- Poiché molti dei parametri legati ai benefici derivanti dal truck platooning e dal suo rapporto con l'infrastruttura, la topologia ed il traffico sono fortemente variabili in funzione della rete stradale presa a riferimento, è inoltre auspicabile un numero maggiore di simulazioni in diverse realtà, in modo da rendere più evidenti i fattori che influenzano i benefici e la loro incidenza.
- Rampe di immissione e di uscita, non è ancora possibile definire risolto il problema che questi elementi costituiscono, appaiono necessari approfondimenti su quando possano inibire l'uso del truck platooning, rendendolo svantaggioso a causa di una distanza limitata e di un numero eccessivo, sono inoltre auspicabili analisi sull'implementazione di strategie di ramp metering e sul loro impatto sulle correnti veicolari, per evitare di imporre il disfacimento del platoon in corrispondenza di ogni rampa. E' evidente come studi ed approfondimenti del genere siano fortemente dipendenti da caratteristiche territoriali, dalla geometria

dell'infrastruttura e dalla composizione del traffico, è quindi auspicabile ci siano più simulazioni a supportare strategie di ramp metering, effettuate su tratti caratteristici dell'infrastruttura in diversi stati dell'Unione Europea.

- E' necessaria una stima dei rischi legati ad una possibile crisi del sistema, soprattutto legata ai tratti in galleria e sui viadotti, che quantifichi come il truck platooning impatti sulle conseguenze ed a quali rischi sia più soggetto.
- Appare utile, nel caso di creazione di un Platooning Service Provider, prevedere un sistema di incentivi e di deterrenti che incoraggino i singoli conducenti a seguire le indicazioni ricevute. Bisogna inoltre valutare un sistema legato alla "reputazione" del veicolo che chiede di unirsi al platoon, in modo che gli altri conducenti sappiano che questo è in buono stato e che il nuovo conducente risulta affidabile. Questo sistema può rendere più facile, per le aziende partecipanti, fidarsi del PSP ed accettare di dividerne i benefici con le aziende concorrenti. [34]
- Molti dei modelli di ottimizzazione legati al risparmio del carburante hanno adottato alcune semplificazioni che è meglio approfondire, è necessario infatti tener conto dei tempi di riposo obbligatori dei conducenti che non è trascurabile fino a quando il livello di automazione previsto è il secondo e non si adeguano le normative legate al digital tachograph. Un altro aspetto da implementare nella maggior parte di questi modelli è come diverse capacità meccaniche legate allo stato dei singoli veicoli ed al loro carico (e quindi le accelerazioni massime) possa impattare sul risparmio di carburante. E' necessario, per la definizione di un business case affidabile che possa rendere appetibile, per un privato, istituire un PSP, che tutte queste variabili siano tenute in considerazione così come lo sia lo stato del traffico sulla rete.

In ultima analisi è necessario raggiungere un grado di precisione sufficiente a stimare, a priori, i risparmi legati al carburante corrispondente ad un determinato viaggio di un determinato veicolo, questo con un certo grado di affidabilità in un'ottica multi-brand di questa tecnologia. E' quindi prevedibile che un sistema di coordinazione come il PSP nasca prima su una rete stradale limitata, probabilmente a livello nazionale, e che solo in una fase più avanzata sia possibile delineare un service provider in grado di guidare il platoon su tutto il territorio europeo. Bisogna inoltre che le principali manovre ed interazioni tra il platoon di camion e gli altri veicoli siano

modellizzati su tratti caratteristici e rappresentativi dell'infrastruttura (lavoro che è stato in parte già svolto e che deve essere solo generalizzato per poter essere applicato in qualsiasi nazione e tratto stradale) e che queste modellizzazioni siano supportate da field test per la calibrazione e validazione degli input. In generale tra gli input analizzati, anche nel caso dei più variabili tra i diversi studi, ormai si è raggiunto un certo grado di precisione che può permettere ai stakeholders coinvolti di stabilire valori condivisi ed un terreno comune su cui pianificare l'implementazione del truck platooning a livello commerciale. Si può consigliare, sulla base dei documenti analizzati, di fornire un range di headway applicabili sulla base delle possibili condizioni di traffico e dell'infrastruttura piuttosto che un valore singolo la cui unica alternativa è rappresentata dal disfacimento del platoon stesso. Il numero di veicoli in grado di formare un platoon è forse il parametro più complicato da valutare a priori, senza avere un quadro completo della lunghezza di tutte le rampe che i camion possono incontrare nel loro tragitto. E' abbastanza facile assumere che all'aumentare del grado di connessione e coordinazione dei platoon in marcia diventi possibile aumentare il numero di veicoli in formazione, questo perché diventa possibile segnalare rampe e punti caratteristici di disfacimento con un certo anticipo, tanto maggiore quanto è lungo il platoon. E' comunque auspicabile approfondire la ricerca nell'ambito di strategie alternative alla disaggregazione, almeno per platoon di dimensioni più ridotte, come il ramp metering o il ricorso a tecnologie C-ITS e comunicazioni V2X. E' inoltre cruciale definire procedure e requisiti certi a livello europeo per l'effettuazione di test su strada, la quasi totalità dei modelli analizzati ha utilizzato parametri ipotizzati per i quali si è auspicata una validazione tramite field test. Poiché, inoltre, alcuni di questi parametri sono comportamentali e possono variare a livello nazionale, bisogna che questi test vengano effettuati su tutto il territorio europeo e non solamente nelle nazioni attualmente all'avanguardia nella legislazione in questo campo, questo permetterebbe anche di tener conto di tutte le peculiarità della rete stradale nei vari paesi dell'Unione.

3.C-ITS Day 1 & Truck Platooning

3.1 C-ITS Day 1

*“Communication between vehicles, infrastructure and with other road users is crucial also to increase the safety of automated vehicles and their full integration into the overall transport system. Cooperation, connectivity, and automation are not only complementary technologies, they reinforce each other and will over time merge completely. **Truck platooning -...- is a good example: connectivity, cooperation and automation must all come together to make it work.** But even more so will cooperation be needed when future automated vehicles have to negotiate much more complex traffic situations safely and efficiently”*

(Brussels, 30.11.2016 COM(2016) 766 final)

Prima di addentrarsi nelle possibili opportunità costituite dall'uso congiunto dei sistemi C-ITS e del truck platooning, però, è necessario fornire un inquadramento generale sul concetto di C-ITS e sulla natura dei Day 1 definiti dalla C-ITS Platform nel 2016. I Cooperative Intelligent Transport Systems sono tecnologie che permettono ai veicoli di comunicare tra loro, con l'infrastruttura e con i centri di controllo del traffico, aumentando in modo significativo la sicurezza intrinseca e le potenzialità del sistema di trasporto. Un insieme di veicoli connessi forma una rete di comunicazione chiamata VANET [70] con alcune caratteristiche peculiari rispetto alle altre reti WIFI, in primo luogo la natura del sistema è decentralizzata, nel senso che a trasmettere ed a ricevere sono elementi mobili sull'infrastruttura, ciò implica una forte dinamicità della rete e dei flussi di informazioni.

“Wireless communications among vehicles, roadside infrastructure, and traffic management centers can enable the development of next-generation Intelligent Transportation Systems so as to tackle basic traffic problems associated with driving safety, road congestion, and vehicle emissions.” (Instantaneous communication capacities of vehicular ad hoc networks – Yang H., Jin W.)

I benefici derivanti dalla capacità di questi veicoli di comunicare con tutte le parti coinvolte nel sistema di trasporto stradale sono facilmente intuibili com'è comprensibile che questi benefici siano fortemente dipendenti dalla penetrazione nel mercato di veicoli attrezzati con i sistemi C-ITS. Come tutte le nuove tecnologie, infatti, l'implementazione nelle fasi iniziali è fortemente vulnerabile, proprio come nel truck platooning, infatti è grande il rischio che i primi ad adottare questa tecnologia non possano usufruirne dei potenziali benefici a causa di un limitato numero di veicoli con cui comunicare. Per rendere questa fase di incertezza il più corta possibile, l'Unione Europea nel 2014 ha istituito *the Platform for the Deployment of Cooperative Intelligent Transport Systems in the European Union* (C-ITS Platform) con lo scopo di istituire delle linee guida per un'implementazione coordinata ed interoperabile delle varie tecnologie di guida cooperativa. E' importante, infatti, che la comunicazione ipotizzata sia utilizzabile da tutti i veicoli e da tutte le centraline presenti sull'infrastruttura, in questo modo il costo da sostenere per implementare un sistema C-ITS non differisce di molto dal costo necessario al funzionamento di più sistemi C-ITS, questo rende particolarmente conveniente l'utilizzo congiunto di diversi sistemi cooperativi e permette di ottenere benefici maggiori con un orizzonte temporale minore, favorendo l'uscita dalla fase "chicken and egg problem". Dalla consultazione congiunta dei principali stakeholders coinvolti, quindi, nella C-ITS Platform si sono definiti quei C-ITS che, in base ai benefici sociali attesi ed alla maturità della tecnologia necessaria, possono essere implementati nell'orizzonte temporale del 2019. Si riporta l'elenco citato nell'introduzione in figura 1.1, ricavato dal C-ITS Platform Final Report 2016, di questi C-ITS Day 1.

#	Day 1 Services
1	Emergency electronic brake light
2	Emergency vehicle approaching
3	Slow or stationary vehicle(s)
4	Traffic jam ahead warning
5	Hazardous location notification
6	Road works warning
7	Weather conditions
8	In-vehicle signage
9	In-vehicle speed limits
10	Probe vehicle data
11	Shockwave damping
12	Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA) / Time To Green (TTG)
13	Signal violation/Intersection safety
14	Traffic signal priority request by designated vehicles

Una volta definito, con il maggior grado di dettaglio possibile definibile, lo scenario attuale del truck platooning e delle sue potenzialità, si è cercato di prevedere come questa tecnologia potrà interagire con i Day 1 services, la cui implementazione sulle strade pubbliche è ipotizzata pressappoco nello stesso orizzonte temporale del truck platooning (2019-2020). Non ci si è prefissi, come scopo, quello di quantificare i benefici derivanti dall'uso congiunto, ma piuttosto di fornire spunti per i futuri studi in questo campo, effettuando una prima selezione dei C-ITS in grado di formare una sinergia con il truck platooning nella maggior parte dei casi, definendo i flussi di informazioni necessari alle due realtà per interfacciarsi, i benefici ottenibili ed i parametri da definire per poterli quantificare. Si sono inoltre espresse alcune considerazioni sugli orizzonti temporali evidenziando dove questi fossero perfettamente analoghi e dove, invece, ci fossero delle discrepanze (come, ad esempio, nel caso del truck platooning e dei C-ITS Day 1 in ambito urbano come si vedrà nei paragrafi seguenti). Della lista di cui sopra, quindi, si sono analizzati solo quei C-ITS che, entrando in sinergia con il truck platooning, possono comportare benefici maggiori di quelli che comporterebbero se si considerassero solo veicoli a guida coordinata. Allo stesso modo non si sono approfonditi i C-ITS Day 1 dei quali il truck platooning beneficia tanto quanto gli altri utenti della strada. Nell'ottica dell'interoperabilità inoltre, questi servizi Day 1 utilizzeranno lo stesso tipo di connessione necessario per mantenere la formazione del platoon mediante DSRC

(Dedicated Short Range Communication): IEEE 802.11p, banda 5.9 GHz, standard ETSI ITS-G5. E' quindi evidente come, **praticamente a costo zero**, un platoon di veicoli pesanti possa ricevere altre informazioni oltre quelle rilevate dai sistemi di bordo e possa, a sua volta, trasmetterle per rendere più facile l'interazione con gli altri veicoli sulla rete stradale.

"A first general conclusion to be drawn from the activities of the C-ITS Platform is that a coordinated action for the deployment of C-ITS in the EU is paramount: a unique legal and technical framework is essential and coordinated efforts to ensure quick uptake of C-ITS are requested.

*A second general conclusion is urgency: the technology is ready, the industry is already deploying C-ITS equipped vehicles in other parts of the world and announced to be ready to deploy in the EU by **2019**, provided that the above-mentioned framework is in place sufficiently in time"* (2016 C-ITS platform final report)

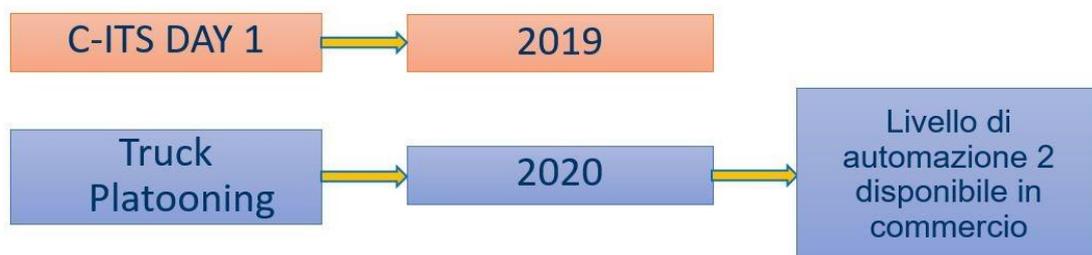


Figura 3.1: Orizzonti temporali di riferimento

Nei paragrafi seguenti, quindi, si considererà il livello di automazione L2 per il truck platooning, che prevede cioè l'utilizzo del CACC e del lane centering, non è presente un sistema automatico di controllo laterale ed i conducenti devono rimanere coinvolti nel loop di guida, pronti a riprendere il controllo senza preavviso in ogni situazione. In questo modo si cerca di considerare lo scenario più realistico possibile, mantenendo uno sguardo obiettivo sulle potenzialità del truck platooning. Prima di procedere all'analisi dei singoli casi, inoltre, è bene far notare come l'utilità dei vari sistemi C-ITS sia fortemente

dipendente dalla realtà geografica nella quale questi vengono implementati, dal tessuto territoriale considerato e dal traffico di veicoli pesanti presente.

3.2 Emergency electronic brake light (EEBL)

“Unexpected hard braking is often the cause of accident. These accidents happen most frequently in sections with stop and go traffic, on high speed roads or in areas with poor visibility. In these cases, the drivers of the vehicles behind may not be able to notice the brake lights of all vehicles ahead of them in time and thus have very limited time to brake (which could cause another dangerous situation – Chain effect)” (C-Roads Working Group 2, Task Force two)

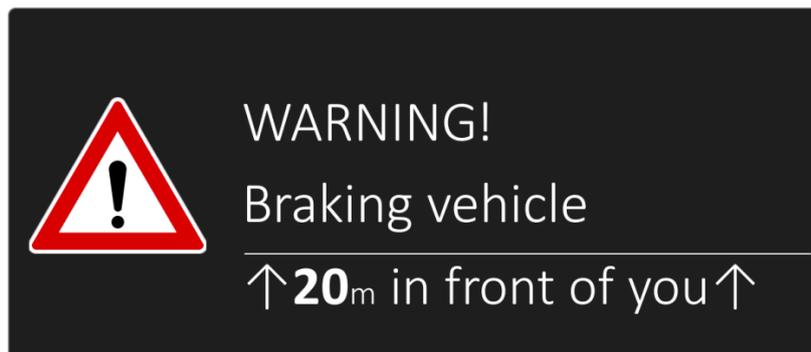


Figura 3.2: C-Roads Working Group 2, Task Force two Common C-ITS Service Definitions [79]

Per definire questo C-ITS ci si basa sulla descrizione dello use case contenuta in [76]: l'EEBL permette ad ogni veicolo equipaggiato di segnalare la sua frenata improvvisa ai veicoli seguenti. Un altro modo per definire l'applicazione dell'EEBL è quanto riportato sul sito del progetto DRIVE C2X.

“This function enhances the safety of vehicles in a dense driving environment. It aims to avoid (fatal) rear end collisions which can occur if a vehicle driving ahead suddenly brakes on highways, especially in dense driving situations or in situations with decreased visibility. The driver will be warned before he is able to

realize that the vehicle ahead is braking hard, especially if he/she does not see the vehicle directly (vehicles in between).”

L'utilità di questo C-ITS non si esplica all'interno del sistema platoon, nel quale la frenata del veicolo precedente viene a priori comunicata tramite WI-FI ai veicoli seguenti, ma è da valutare nelle interazioni tra leading vehicle e traffico antistante. In primo luogo l'implementazione dell'EEBL ha una funzione di ridondanza in quanto i veicoli in grado di partecipare ad un platoon sono già forniti di FCW (Forward Collision Warning), basato su radar e lidar ed in grado di rilevare una frenata improvvisa del veicolo antecedente al platoon. In caso di condizioni atmosferiche in grado di inibire la visibilità, infatti, il lidar non è in grado di assicurare la rilevazione delle frenate del veicolo precedente il platoon, l'EEBL potrebbe assicurare la ridondanza in congiunzione ai radar equipaggiati. Questo scenario è però soggetto alla penetrazione dei veicoli dotati di questo sistema C-ITS sul mercato. Bisogna, inoltre, notare come l'EEBL sia soggetto a potenziali ritardi di trasmissione dovuti al maltempo. L'EEBL è anche in grado di rilevare una frenata improvvisa anche a due veicoli di distanza (da parte, cioè, del veicolo che precede quello antecedente il platoon), grazie alla comunicazione WI-FI, inoltre, può essere rilevata anche la manovra di frenata nelle corsie adiacenti. Queste funzioni non sono assicurate dal FCW, come schematizzato nella figura 3.2.

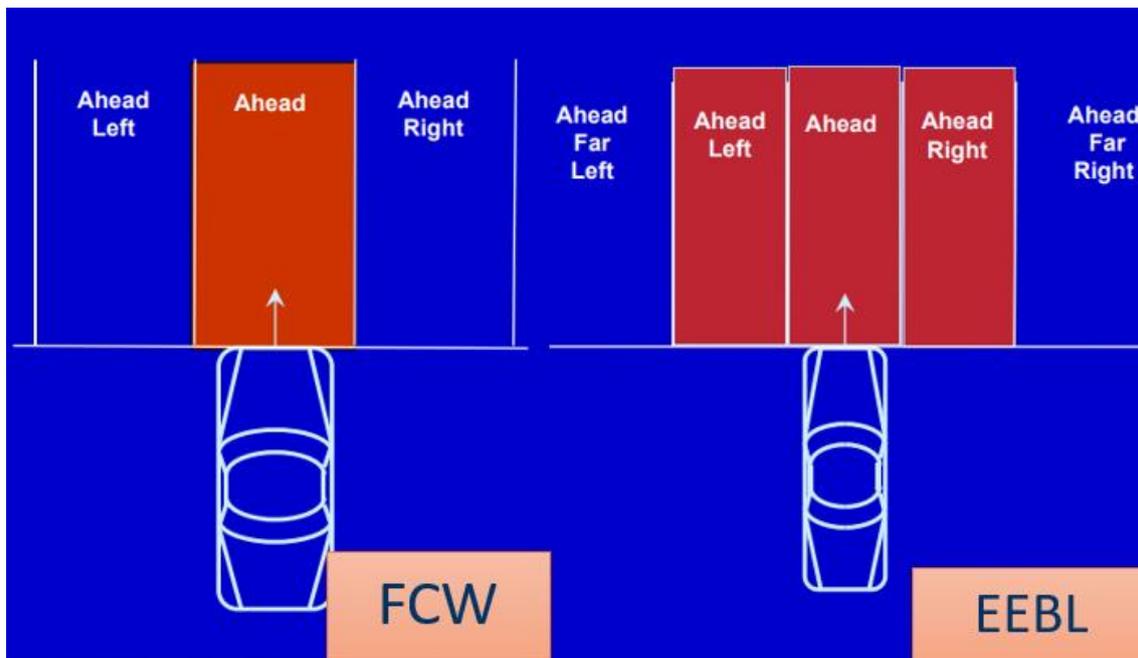


Figura 3.3: FCW ed EEBL a confronto - Vehicle Safety Communications - Applications [78]

Anche in questo caso, però, è da tener presente che tra le dotazioni tecnologiche dei camion dedicati al truck platooning è presente il LCW (Lane Change Warning) che sofferisce ad una funzione analoga. Inoltre, poiché tutti i sistemi elencati sono safety critical si dà per scontato che siano in grado di assicurare per tempo la trasmissione del messaggio e che nessuno di questi abbia un vantaggio intrinseco sugli altri in questo senso. E' quindi da valutare se questo sistema C-ITS impatti in maniera rilevante sul truck platooning o se non costituisca vantaggi specifici, alla luce di quanto esposto, però, si evidenzia come il truck platooning, con i suoi headway ridotti, sia potenzialmente più esposto ad un tamponamento a catena, scenario frequente in caso di traffic jam in cui le frenate brusche avvengono in numero maggiore e che quindi, senza alcun costo aggiuntivo, l'implementazione dell'EEBL sia in grado di mitigare almeno questo scenario.

3.3 Emergency vehicle approaching

Nonostante non sia immediata la correlazione tra questo C-ITS ed il truck platooning, è invece fondamentale prendere in considerazione il tipo di comunicazione tra il platoon ed un veicolo d'emergenza. Le norme ETSI [76] definiscono l'use case dell'emergency vehicle warning, in cui un veicolo dedicato alle emergenze indica la sua presenza a tutti i veicoli circostanti ed alle centraline presenti sull'infrastruttura dedicate alla comunicazione V2I. Nel progetto C2X questo servizio è stato definito come segue:

“Wireless communication is used to distribute messages about approaching emergency vehicles which claim the right of way. If a received message is relevant in the current situation the driver will be informed at an early stage. Depending on the OEM's strategy the information is displayed on the head unit or another display device and may also be augmented by audio or haptic signals.”

In questo capitolo si farà spesso riferimento a questi tre documenti ([77],[78],[79]), poichè nella definizione dei C-ITS Day 1, essendo queste realtà che devono ancora entrare

nel mercato, alcune sfumature possono variare tra i vari documenti. Si fa oltre notare in questa sede come sia previsto un aggiornamento degli standard ETSI all'inizio del 2018, che può comportare qualche modifica alle definizioni riportate in questa tesi.

Si riporta, quindi, il flusso delle informazioni ipotizzato in [79].

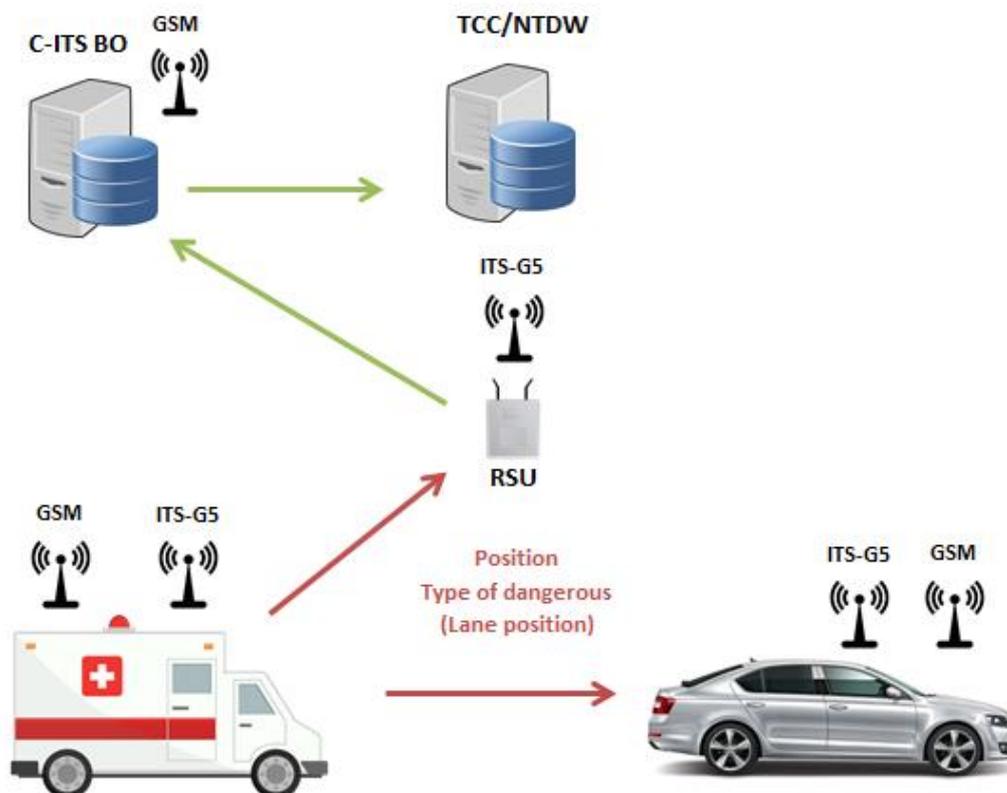


Figura 3.4: Flusso delle informazioni

E' importante che un platoon riceva per tempo le informazioni riguardanti il veicolo di emergenza come la posizione, velocità di marcia e destinazione, soprattutto se si ipotizza la presenza di tre o più veicoli pesanti. **In ambito extraurbano è fondamentale che un veicolo di soccorso possa imboccare la rampa desiderata**, non è quindi accettabile che un platoon ne blocchi il percorso in questi punti chiave dell'infrastruttura. A meno di ipotizzare livelli penetrazione nel mercato particolarmente alti di veicoli cooperativi, quindi, sembra difficile che questa comunicazione possa sussistere esclusivamente tramite V2V prescindendo da soluzioni V2I. Se anche si ignorano le potenziali interferenze e problemi di copertura del segnale, ipotizzando un range di trasmissione di

1 km da parte del veicolo di emergenza, nel secondo capitolo si è evidenziato come gli spazi necessari alla disaggregazione del platoon siano fortemente variabili ed, in generale, richiedano qualche km [19]. Si riporta uno schema riassuntivo di tutti gli input necessari a determinare la distanza necessaria al disfacimento.



Figura 3.5: Distanza necessaria al disfacimento del platoon

Poiché non tutta la rete infrastrutturale è ancora attrezzata da centraline per le trasmissioni V2I, può essere interessante approfondire la percentuale di veicoli presenti nella rete VANET in grado di trasmettere alle distanze necessarie la presenza di veicoli d'emergenza, sempre tenendo presente che all'aumentare dei veicoli presenti aumentano le distanze di disaggregazione. E' anche da valutare la potenziale incidenza nelle ore notturne della presenza del platoon sul tempo di marcia del veicolo d'emergenza, di notte infatti sono ipotizzabili platoon più lunghi ed un numero molto più limitato di veicoli (e quindi di veicoli coordinati). E' anche possibile ipotizzare un'altra soluzione per evitare interferenze tra il veicolo d'emergenza ed il platoon composto da veicoli pesanti. Se, infatti, si coinvolge il potenziale PSP nel flusso di informazioni, questo può calcolare la velocità di marcia che il platoon deve tenere per non incontrare il veicolo di emergenza nel punto di entrata o di uscita dal ramo stradale. La stessa funzione può essere svolta dal gestore dell'infrastruttura o dal centro di controllo del traffico, a patto che questi siano disposti ad assumersi la responsabilità derivante dal poter controllare la velocità del platoon (lo stesso dicasi nel caso dell'ordine di disaggregazione). La catena di responsabilità in questo caso, infatti, è una delle tematiche non ancora affrontate, è necessario determinare su chi ricada la responsabilità di inviare le informazioni correttamente ed in tempo al leading vehicle. Bisogna valutare, inoltre, la possibilità di

allertare anche i following vehicle, soprattutto in uno scenario che preveda il livello di automazione L2, deve essere quindi definita una catena di comando a tutti i livelli ed in tutte le eventualità. Appare inoltre evidente la necessità di approfondire lo studio di modellizzazione sulla manovra di disaggregazione che deve coprire sia fasce orarie di punta che notturne, deve prevedere diversi orizzonti temporali in cui l'informazione giunge al platoon (quantificando il ritardo di comunicazione massimo accettabile in tutte le situazioni) e deve essere effettuato su diversi tratti caratteristici delle reti infrastrutturali su cui si prevede l'impiego del truck platooning. Per quanto riguarda le rampe di entrata è legittimo aspettarsi le stesse tematiche appena trattate in quanto è più che plausibile che i tempi di immissione di un platoon composto da veicoli pesanti siano maggiori di quelli tradizionali. Bisogna quindi che questi vengano valutati in funzione dei flussi veicoli più penalizzanti per valutare l'impatto sui tempi di immissione di un veicolo d'emergenza che voglia entrare nel ramo principale. Qualora non risultassero accettabili si dovrà impedire che il platoon blocchi la rampa prevedendone la disaggregazione o modificandone la velocità di marcia.

Nel documento [79] di C-Road, inoltre, viene trattato anche lo use case che prevede la segnalazione di un punto fisso in cui è fermo il veicolo d'emergenza per le operazioni di soccorso. In questo caso le tematiche sono simili a quelle trattate in seguito per il C-ITS di road works warning, se ad esempio l'intervento comporta la chiusura di una corsia un PSP o il gestore dell'infrastruttura dovrà valutare la possibilità di disfacimento del platoon in funzione della densità di traffico. Questo nell'ipotesi che al platoon composto da veicoli pesanti sia permesso circolare su corsie diverse dalla prima, si evidenzia nuovamente come un quadro normativo sia ancora assente e ci si debba muovere con la dovuta cautela nell'effettuare questo tipo di considerazioni. Se si ipotizza che una situazione del genere venga segnalata per tempo al PSP si può facilmente prevedere un miglioramento del modello di ottimizzazione utilizzato che può annullare le manovre di merging previste su quel tratto stradale, dirottare (se ritenuto conveniente) following vehicle verso leading vehicle su altri rami dell'infrastruttura e ricalcolare il percorso per platoon già formati ed in viaggio sulla rete considerata.

3.4 Road Works Warning

In questo caso lo use case prevede che le unità al margine della strada o il veicolo preposti al segnalamento del cantiere inviino comunicazioni V2V o V2I che rendano consapevoli gli altri utenti della strada ed è più o meno analogo nelle definizioni riportate in [77] e [78]. Il documento di C-Roads [79], invece, scende più nello specifico riportando lo use case adottato in Olanda e quello adottato in Austria che per definizione differiscono poco da quanto già riportato ma scendono più nel dettaglio negli scenari di implementazione. Nel caso olandese si fa riferimento specifico a quattro tipi di cantiere: mobile, fisso per breve periodo, fisso per lungo periodo, non pianificato. Nel definire i flussi di informazioni comunicati dal C-ITS in oggetto, il caso olandese fa esplicito riferimento alla distribuzione di queste informazioni anche a privati come service provider che, in caso di necessità, può inviare indicazioni agli utenti del suo servizio tramite cellulare.

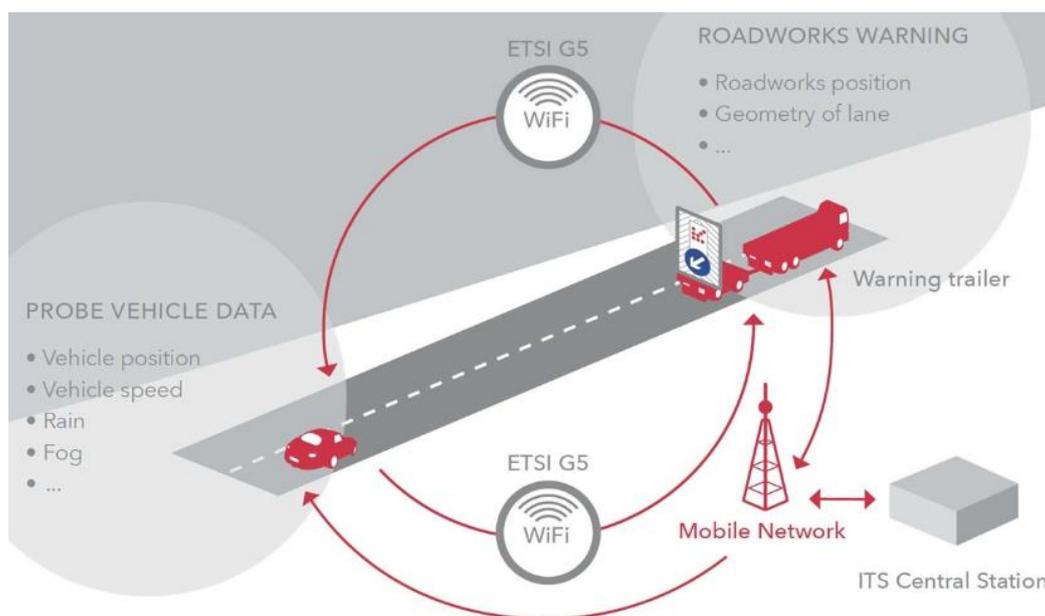


Figura 3.6: Use case olandese

Evidentemente l'informazione contenente le coordinate spaziali del cantiere deve essere sufficientemente accurata e deve contenere la corsia resa inagibile dai lavori. Nel caso austriaco invece gli scenari considerati sono tre: Stand-alone safety trailer, Safety trailer

augmented, TCC triggered. Di questi solo l'ultimo è fornisce l'informazione con sufficiente anticipo da poter comportare qualche differenza nel caso del truck platooning.

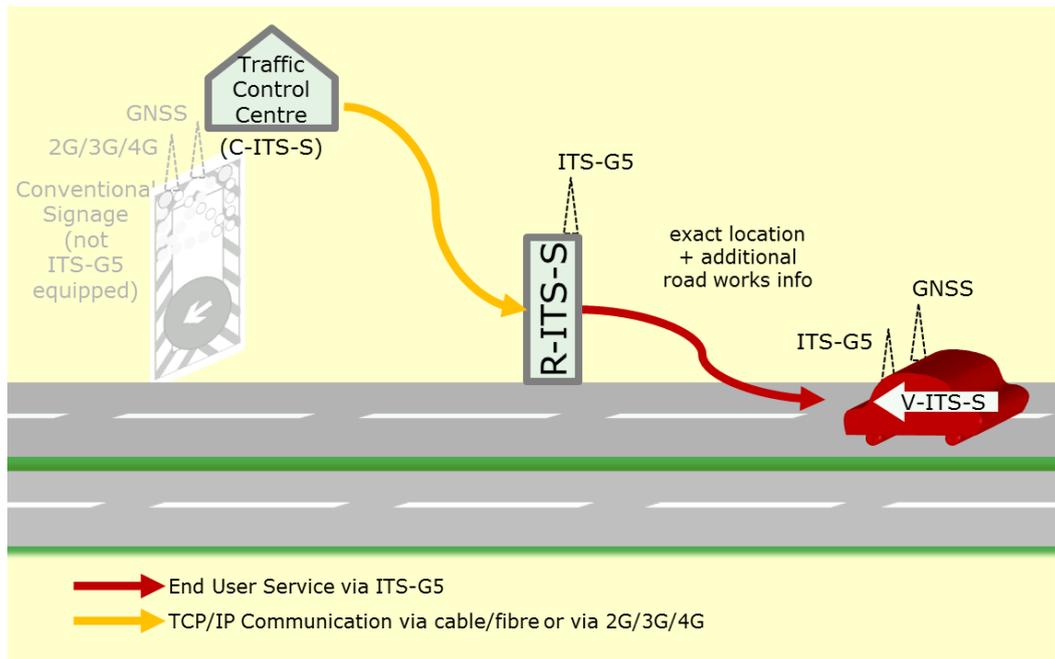


Figura 3.7: TCC triggered

Si tralasciano quindi le ulteriori sfumature che differenziano i due casi, si fa solo notare come in qualsiasi caso, perché l'informazione abbia una qualche rilevanza in rapporto alle peculiarità del truck platooning, è difficile che si possa prescindere dalla comunicazione V2I, almeno nei primi anni dall'entrata nel mercato dei sistemi C-ITS, questi sempre per la forte dipendenza del range di trasmissione dalla percentuale di penetrazione nel mercato. Le informazioni riguardanti il cantiere stradale, infatti, se fornite con il giusto anticipo possono portare all'opportuna disaggregazione del platoon che può rendersi necessaria se una delle corsie disponibile non risulta più disponibile al transito ed i livelli di traffico rendono proibitiva la manovra di cambio corsia ed il transito del platoon. Qualora non fosse necessaria la disaggregazione, comunque, il road works warning permette a tutti i conducenti di prepararsi al cambio di corsia (non bisogna mai perdere di vista l'ipotesi assunta di un livello di automazione L2).

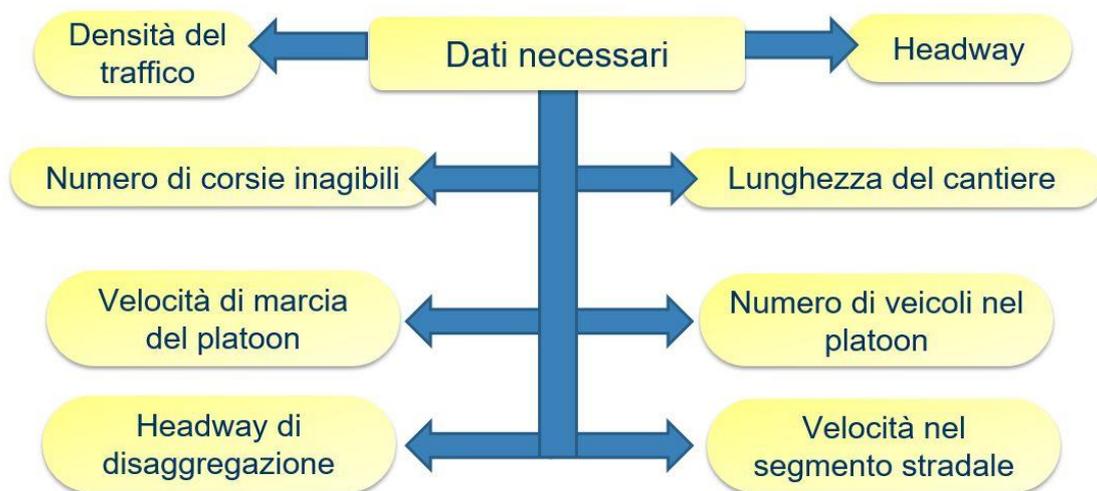


Figura 3.8: Flusso di dati per il Road Works Warning

Anche in questo caso, i modelli di ottimizzazione utilizzati dal PSP beneficiano dall'ulteriore flusso di informazioni ottenuto dal C-ITS che rende possibile il rerouting ed evita che vengano concertate manovre di merging su quel ramo stradale. Poiché, in ogni caso, è presente del personale nella carreggiata è bene che anche in questo caso la catena di responsabilità sia ben definita sin da principio, questo tipo di discorso però non è peculiare del truck platooning ma riguarda qualsiasi tipo di sistema che preveda un certo livello di automazione.

3.5 Probe Vehicle Data

Un veicolo sonda (probe vehicle) è un veicolo in grado di raccogliere dati di traffico in tempo reale ed inviarli a centri di controllo del traffico o ai gestori dell'infrastruttura per permettere di implementare con maggior precisione funzioni di smart routing, identificare incidenti e monitorare lo stato del traffico.

“The probe vehicle techniques [...] are unique in that they are typically intelligent transportation system (ITS) applications designed primarily for collecting data in real-time. Their primary application is for a specific purpose other than travel time data

collection, such as real-time traffic operations monitoring, incident detection, and route guidance applications” (TURNER, S., M., EISELE, W., L. and BENZ, R., J., HOLDENER, J., D., 1998. Travel Time Data Collection Handbook. Ch. 5)

Anche in questo caso il documento [79] fa una distinzione tra gli use cases Olandese ed Austriaco, le differenze riportate però non sono rilevanti alle considerazioni che seguiranno quindi si rimanda a tale documento per i dettagli. Si evidenzia solo come nello use case Olandese sia esplicitato che i dati registrati dai veicoli siano resi anonimi durante la loro elaborazione.

Si dà per scontato che i camion dedicati al truck platooning siano già equipaggiati con un affidabile sistema GPS e con la dotazione tecnologica necessaria al platooning descritta nel secondo capitolo. Questo vuol dire che un platoon è, di per sé, già in grado di rilevare i dati di traffico rilevanti senza alcun costo aggiuntivo ed a trasmetterli utilizzando la stessa connessione con cui è in contatto con il PSP. Ciò vuol dire che, dal giorno dopo la sua entrata sul mercato, un PSP possa ricevere dati sui flussi di traffico nei rami interessati da un certo livello di trasporto merci, questi dati hanno un valore economico in grado di renderne ancora **più appetibile il business case** e che non dovrebbe essere ignorato, soprattutto nelle fasi iniziali di impiego degli altri sistemi C-ITS con una penetrazione limitata nel mercato di automobili in grado di fare da probe vehicle.

Un altro possibile vantaggio dei camion sulle automobili, in questo caso, è costituito dalla privacy, tematica molto meno impattante per quanto riguarda i veicoli commerciali e che comunque deve essere affrontata a priori per l’istituzione di un PSP e del platooning multi-brand. Questo vantaggio può venire a mancare nel caso il flusso di dati venga reso anonimo, come nel caso Olandese, ma non è detto che dai conducenti venga comunque percepito come tale. Sempre in Olanda, lungo il Cooperative ITS Corridor, attualmente sono in funzione postazioni fisse che utilizzano la connessione ETSI G5 per ricevere i dati dai veicoli e trasmetterli ai centri di controllo del traffico.

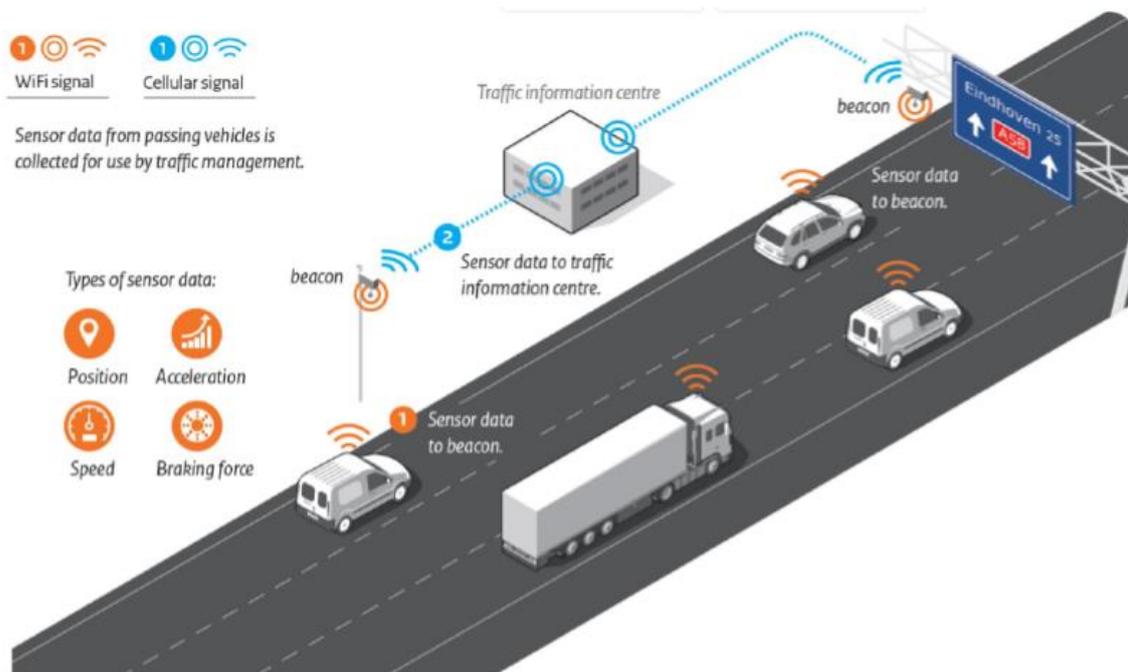


Figura 3.9: Esempio Olandese – Rijkswaterstaat

3.6 GLOSA – Green Light Optimized Speed Advice

In questo caso, per dare una definizione di use case si ricorre nuovamente a quanto riportato nel documento ETSI [76]: Questo C-ITS permette alla lanterna semaforica di inviare dati associati al corrente stato del ciclo.

Le potenzialità appaiono più chiare in quanto riportato nel programma CSX:

“This function reduces stop times and unnecessary acceleration in urban traffic situations to save fuel and reduce emissions. The provided speed advice helps to find the optimal speed to pass the next traffic lights during a green phase. In case it is not possible to provide a speed advice, the remaining time to green is displayed.”

Nel documento C-Roads [79], invece, si fa esplicitamente riferimento alle potenzialità legate all’utilizzo di questo C-ITS in sinergia con la tecnologia platoon (*“Objective: To calculate a speed advice based on signal phase and timing information, to enable a vehicle or platoon to pass a signalised intersection in the most efficient manner”*). In

questo caso il flusso di informazioni è necessariamente V2I, oltre ad un valore di velocità ottimale ed allo stato della lanterna semaforica possono essere inviate anche informazioni riguardanti la topologia dell'incrocio. Anche in questo caso il flusso di informazioni a beneficio del platoon formato da veicoli pesanti è essenzialmente “gratuito” in quanto né il platoon né il GLOSA necessitano di componenti aggiuntivi per poter parlare tra loro. L'unico requisito, in questo caso, è che questo C-ITS sia progettato in modo che sia in grado di calcolare la manovra di attraversamento dell'intero platoon (il problema è modellistico e non dovrebbe costituire una barriera all'utilizzo congiunto dei due sistemi, si rimanda ad esempio ad [81]). E' necessario che il GLOSA sia in grado di verificare che l'intervallo di verde sia abbastanza lungo da permettere il passaggio dell'intero platoon o, in caso contrario, ne possa imporre la disaggregazione. E' evidente come il flusso di informazioni tra platoon ed impianto semaforico comporti alcune peculiarità rispetto al resto del traffico, nello specifico, per ricevere dal GLOSA il valore di velocità consigliata, è necessario che il platoon trasmetta almeno il numero di veicoli di cui è composto e la sua lunghezza totale (funzione dell'headway). Platoon composti da due o tre veicoli pesanti, in realtà, non dovrebbero comportare eccessivi disagi alle altre componenti veicolari anzi è possibile che il sistema aiuti i primi conducenti utilizzatori della tecnologia ad interfacciarsi con intersezioni urbane senza bisogno di disfare il platoon.

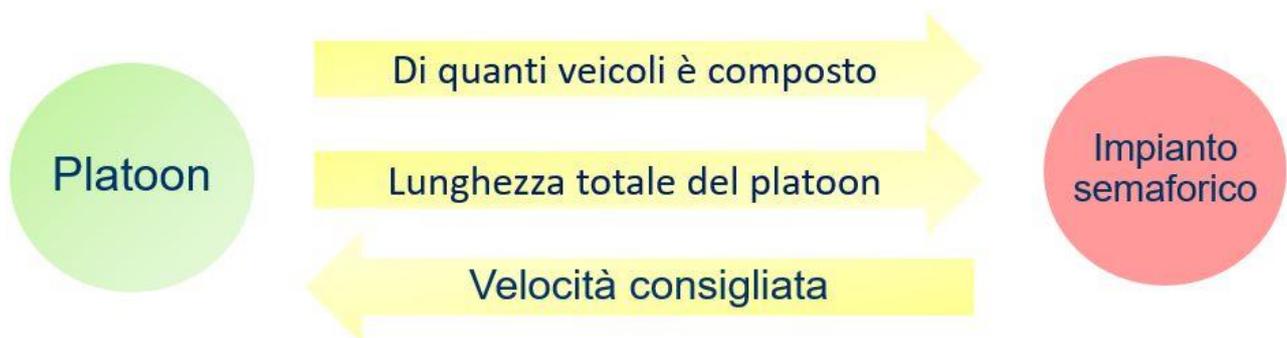


Figura 3.10: Flusso di informazioni nel GLOSA

Questo C-ITS Day 1 è il primo, tra quelli esaminati, che potrebbe sviluppare una sinergia con il truck platooning in orizzonti temporali più lunghi di quelli ipotizzati, questo perché è facilmente prevedibile come il truck platooning sia confinato nei rami principali dell'infrastruttura, almeno per i primi anni dall'entrata della tecnologia nel mercato. Sono

inoltre ancora da approfondire tutti gli aspetti legati all'interazione tra tessuto urbano e truck platooning come ad esempio le possibili ricadute sulle utenze deboli. E' da segnalare anche una scarsa presenza, nella bibliografia, di studi modellistici riguardanti la manovra di disaggregazione del truck platoon nel traffico urbano, tipicamente congestionato. La stessa utilità del truck platooning è da valutare in ambito urbano in quanto non è possibile sfruttare a pieno i risparmi legati al carburante a velocità di circa 50 km/h. E' opportuno però ipotizzare che, in un orizzonte temporale più ampio, il truck platooning possa occupare porzioni sempre maggiori dell'infrastruttura, all'aumentare della normalizzazione di tale tecnologia sul mercato. Ciò implica che non è impossibile immaginare un platoon che, per dirigersi dal punto A al punto B, debba attraversare marginalmente un centro abitato. In questo caso diventa determinante impedire la disaggregazione di tale platoon e costringere, ad esempio, il leading vehicle appena uscito dalla città ad attendere un following vehicle rimasto imbottigliato nel traffico. Evitando tale disaggregazione, inoltre, si limitano le interazioni con il traffico circostante, non ancora modellizzate e simulate e si riduce comunque il numero di accelerazioni e decelerazioni complessive effettuate da veicoli pesanti, le più impattanti dal punto di vista ambientale. Se, quindi, si ipotizza un attraversamento periferico di un centro abitato, è anche più semplice implementare il sistema GLOSA su un numero limitato di intersezioni, sui rami dedicati all'attraversamento. E' necessario valutare il possibile utilizzo del GLOSA e del truck platooning in concerto con il C-ITS Day 1.5 "Traffic information & smart routing" in grado di indicare il tragitto ottimale, con il maggior numero di intersezioni attrezzate con il GLOSA e che esclude rami stradali troppo corti per ospitare un intero platoon di veicoli pesanti. Come ultima analisi si riporta che il GLOSA è in grado che il platoon, per evitare di disfarsi, sprechi gli ultimi secondi di verde disponibili per attendere l'inizio di un nuovo ciclo.



Figura 3.11: Pro e contro del GLOSA in concerto con il truck platooning

Senza dedicare un paragrafo alla possibilità di prioritizzare il truck platooning alle intersezioni, alla stregua dei veicoli di emergenza, si riportano solo alcune considerazioni in questa sede. Già in alcune realtà urbane è possibile dare priorità al trasporto merci su alcune tratte e fasce orarie, si cita quindi il progetto COMPASS4D che tra i servizi C-ITS implementati ha inserito l'Energy Efficient Intersection.

“The Energy Efficient Intersection (EEI) service will reduce energy consumption and vehicle emissions at signalled intersections. Selected vehicles (Heavy Goods Vehicles, Emergency Vehicles, Public Transport) will be granted a green light when approaching the intersection, thus avoiding stops and delays. This service will also provide information to other drivers to anticipate current and upcoming traffic light phases and adapt their speed accordingly (GLOSA).” [82]

Si evidenzia quindi come i benefici ottenuti dalla riduzione delle emissioni siano ancora più elevati quando a ricevere la priorità è un platoon composto da veicoli pesanti. Allo stesso tempo il tempo di trasporto dei beni diventa più affidabile, migliorando il servizio

reso all'utente finale, e si incoraggia i conducenti ad adottare gli itinerari dedicati negli orari consigliati, riducendone l'incidenza sui flussi di traffico che possono venire penalizzati dalla prioritizzazione alla lanterna semaforica o dal GLOSA.

3.7 Traffic jam ahead warning & slow or stationary vehicle

Si trattano questi due C-ITS Day 1 nello stesso paragrafo perché abbastanza analoghi nella loro possibile interazione con il truck platooning. Lo slow or stationary vehicle warning è in grado di avvertire il veicolo seguente della presenza di un veicolo in panne o di un veicolo particolarmente lento su quel ramo stradale. Tale funzione è quasi analoga a quella garantita dal FCW se limitata alla comunicazione V2V. In uno scenario legale però, in cui è impedita al platoon la manovra di sorpasso, il C-ITS in questione può interagire con le funzioni del PSP ed evitare che un truck platoon rimanga virtualmente imbottigliato dietro un veicolo lento. Se, infatti, lo slow vehicle comunica con la centralina stradale la sua posizione e la sua condizione, l'informazione giunta al PSP permette di coordinare gli eventuali truck platoon presenti sulla rete stradale in modo da escludere il ramo in oggetto. Qualora sia invece il leading vehicle a rilevare un veicolo del genere sul suo tragitto, questo può comunicarlo al PSP perché rimandi la manovra di merging (i singoli veicoli pesanti, infatti, possono superare il veicolo rallentato senza ulteriori limitazioni) o perché dirotti i following vehicles a lui assegnati ad altri leading vehicle su altri rami stradali nelle vicinanze, sempre secondo gli output restituiti dal modello di ottimizzazione utilizzato, modificati una volta ricevuta come input la posizione e la situazione dello slow vehicle. Dalla bibliografia però è emerso il bisogno di approfondire modelli di ottimizzazione dinamici in grado di ricomputare i percorsi ottimali in funzione di informazioni giunte con i veicoli già in viaggio. E' da far notare, inoltre, che se gli equipaggiamenti tecnologici del camion permettono di identificare la sagoma di un veicolo tipicamente lento, come un trattore, non è necessario che questo abbia il sistema slow vehicle perché il leading vehicle avverta il PSP.

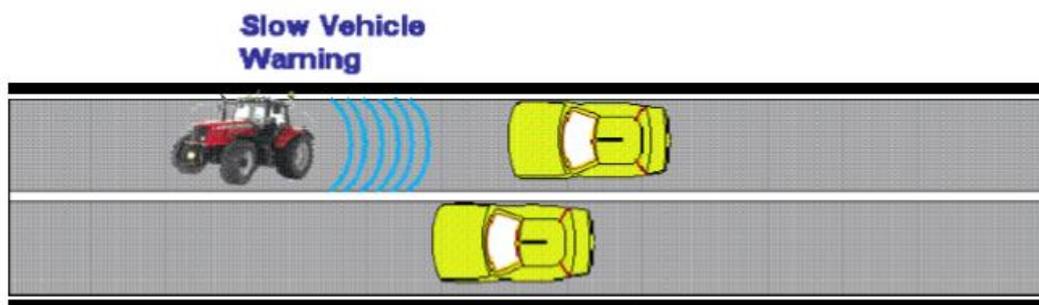


Figure C.4: Slow vehicle warning use case scenario

Figura 3.12: Slow vehicle warning use case scenario [76]

Un beneficio analogo è quello ottenibile dal traffic jam ahead warning, sempre a patto che l'informazione giunga al PSP. Le potenzialità legate a questo tipo di servizi riguardano essenzialmente il rerouting ed un più preciso modello di ottimizzazione in grado di usufruire in maniera quasi gratuita del flusso di informazioni garantito dai C-ITS. Il traffic jam ahead warning ha un'utilità nel rerouting indipendentemente dalla legislazione sulle corsie permesse ad un platoon a differenza dello slow or stationary vehicle che, invece, è determinante solo nell'ipotesi particolarmente restrittiva di marcia limitata alla prima corsia.

Si mette inoltre in evidenza come, in questo capitolo, si siano elaborate le ipotesi di funzionamento e di scambio delle informazioni, considerando un Platooning Service Provider privato e separato dalla figura del gestore stradale. E' quindi necessario che le informazioni giunte al centro del traffico vengano condivise con questo service provider secondo modalità ed accordi economici che non vengono approfonditi in questa tesi. Se invece i servizi del service provider vengono ipotizzati in capo all'autorità gestore dell'infrastruttura, è automatico assumere che i modelli di ottimizzazione ricevano tutti i dati registrati dalle centraline stradali.

3.8 Weather conditions

Il documento [79], nel descrivere lo use case di questo C-ITS, riporta quanto segue, citando Study on the Deployment of C-ITS in Europe: Final Report:

“The objective of this service is to increase safety through providing accurate and up-to-date local weather information. Drivers are informed about dangerous weather conditions ahead, especially where the danger is difficult to perceive visually, such as black ice or strong gusts of wind. Vehicles are sent information from roadside units warning the driver of dangerous, or changeable weather conditions. Alternatively, the messages may be transmitted via the cellular network. This service is applicable to all roads and vehicle types”[8]

Sul sito del progetto C2X, invece questo C-ITS viene descritto con le seguenti parole: *“The objective of this function is to increase traffic safety by informing drivers about critical weather conditions ahead. The system particularly applies to scenarios where the danger can hardly be visually perceived by the driver or in which the weather conditions change unforeseeably. These may include strong wind gusts, black ice, heavy rain or other events.”*[77]

Come illustrato nel paragrafo dedicato all’Emergency Electronic Brake Light, la presenza di sistemi radar sui veicoli equipaggiati per il truck platooning assicura che la formazione possa essere mantenuta anche con condizioni di visibilità ridotta, in cui i lidar perdono di affidabilità. C’è però una tematica ambientale rilevante che non può essere trascurata quando si immagina l’impiego di un truck platoon in condizioni meteo avverse: la presenza di ghiaccio sul suolo stradale. In questo scenario, infatti, lo spazio di frenata necessario aumenta in maniera consistente al diminuire dell’aderenza dei pneumatici sull’asfalto.

“(…) the driver will be more prepared for the hazard and will have the opportunity to adjust their speed accordingly, preventing sudden braking, accelerating, swerving or overtaking manoeuvres” [8]

Se l'incremento dello spazio di frenatura risulta pericoloso già per un veicolo tradizionale, le cautele che bisogna adottare nel tenere un headway ridotto come nel caso del platoon sono anche maggiori. Questa tematica non è stata approfondita in modo particolare nella bibliografia dedicata al truck platooning, anche se nella realtà delle cose sembra necessaria la semplice implementazione, nel CACC, dell'aumento dell'headway mantenuto in caso di strada ghiacciata. Poiché, però, può capitare che in funzione delle diverse densità di traffico l'aumento dell'headway coinvolga anche alcuni chilometri, appare evidente come la trasmissione, con un certo anticipo, dell'informazione "strada ghiacciata" al platoon possa far sì che questo giunga con un headway già adatto nel tratto di infrastruttura soggetto a condizioni meteo avverse. E' da determinare, in questo caso, se il flusso di informazioni può viaggiare solo tramite canali V2V in quanto non strettamente safety critical (sui veicoli pesanti formanti il platoon, infatti, sono presenti gli equipaggiamenti tecnologici in grado di rilevare il ghiaccio su strada non appena si incontra questa condizione) o se, in alcuni tratti critici dell'infrastruttura con pendenza e curvature rilevanti, è preferibile ci sia una centralina in grado di assicurare un aggiuntivo canale V2I. E' inoltre opportuno evidenziare come la perdita di aderenza possa comportare problematiche rilevanti, per un truck platoon, anche in tratti caratterizzati da una forte pendenza in salita. In questo caso infatti è necessario prevedere un coefficiente aggiuntivo nel ragionare sul tipo di problematiche illustrate nel paragrafo 2.6.5. Si evidenzia, inoltre, come in [79] si assegni alle comunicazioni V2I questo tipo di informazioni ma che non è scontato che tutta l'infrastruttura, al Day 1, sia dotata di centraline apposite né tanto meno di sensori per la rilevazione di condizioni meteo avverse, rendendo il canale V2V una possibilità concreta.

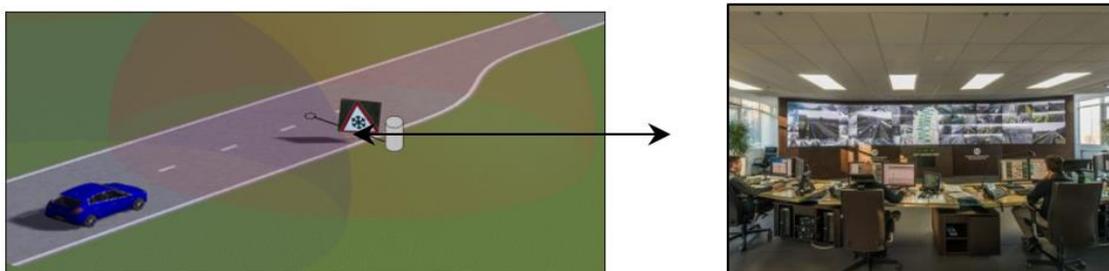


Figura 3.13:V2I - ghiaccio su strada [79]

3.9 C-ITS Day 1.5 ed oltre & Truck Platooning

Ci sono, inoltre, servizi C-ITS che non sono risultati abbastanza impattanti, nel quadro generale, da esser compresi nella lista di C-ITS Day 1 ma che, al momento della loro implementazione sulle strade pubbliche, saranno probabilmente in grado di creare una forte sinergia col truck platooning, rendendo l'utilizzo della tecnologia ancora più conveniente e l'interazione con le altre correnti veicolari meno problematica.

❖ Cooperative merging assistance

Nel documento [76] l'use case è descritto come segue:

“This use case considers that the vehicles involved in a merging negotiate together the merging process to avoid collision. If the concerned vehicles have map data bases, the merging region can be determined in co-operation”

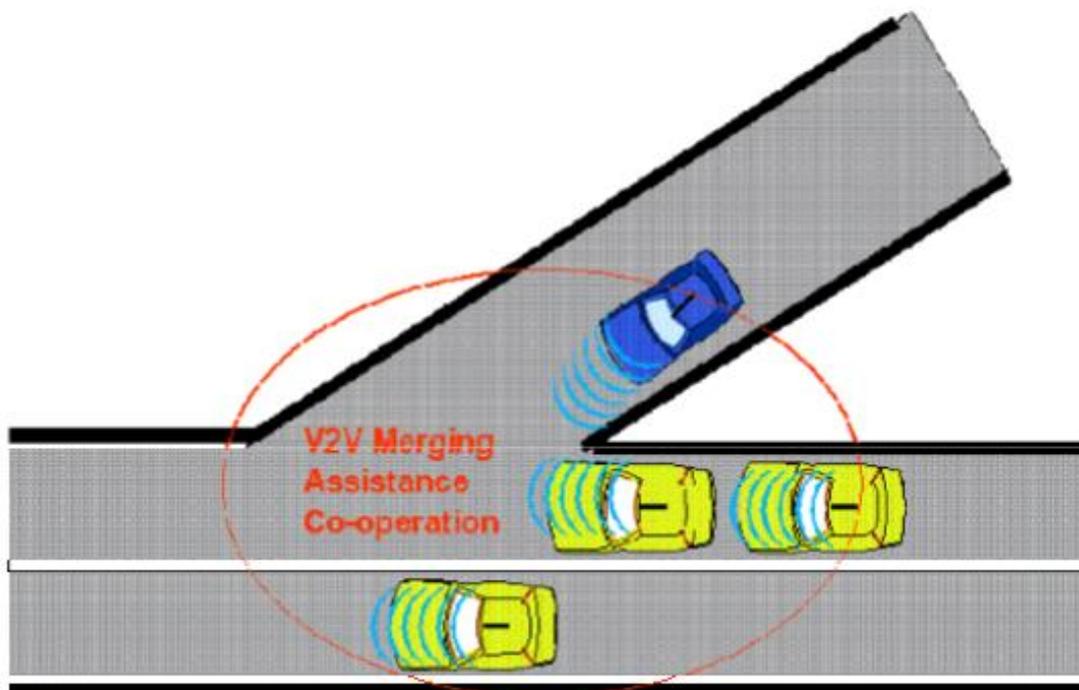


Figura 3.14: Co-operative merging assistance use case scenario [76]

Nonostante questo C-ITS sia rivolto a tutti i veicoli, da quanto esposto nei capitoli precedenti, appare evidente come le applicazioni per il truck platooning siano promettenti, soprattutto nel caso dell'immissione di quest'ultimo. Date le lunghezze spesso rilevanti della manovra di disaggregazione, infatti, non è possibile ipotizzare la creazione di un gap sufficiente al passaggio di un veicolo tradizionale in uscita dopo l'input di una comunicazione V2V (il cui range difficilmente è abbastanza ampio). Nel caso invece in cui sia il truck platoon a doversi immettere nel flusso principale è possibile, tramite una centralina di regolazione del traffico, trasmettere ai veicoli a monte l'indicazione di rallentare, in modo che si formi un gap sufficiente a far passare l'intero platoon una volta che questo giunga alla rampa. Un utilizzo simile è però condizionato pesantemente dalla percentuale di penetrazione nel mercato dei veicoli a guida cooperativa, devono infatti essere in numero sufficiente a modificare il comportamento del flusso di traffico comprendente il resto dei veicoli tradizionali (generalmente parlando si riporta il valore indicativo di 1:20).

“A single autonomous vehicle can control the flow of at least 20 human-controlled vehicles around it, with substantial reductions in velocity standard deviation, excessive braking, and fuel consumption.” [55]

❖ Electronic toll collect

Si fa nuovamente riferimento al documento [76] che assegna lo svolgimento di questo servizio C-ITS ad una centralina stradale con la capacità di controllare l'accesso alle porzioni dell'infrastruttura per cui è previsto un pedaggio. Il flusso di comunicazioni, in questo caso, è necessariamente V2I e permette, ipoteticamente parlando, di riscuotere il pedaggio da tutti i veicoli facenti parte del truck platoon contemporaneamente. In questo modo è possibile evitare il disfacimento del platoon stesso e, inoltre, l'occupazione di spazi ingenti da parte dei veicoli pesanti costretti ad attendere i following vehicle ancora coinvolti nella procedura di pagamento. Anche in questo caso il C-ITS è rivolto a tutti i veicoli in grado di comunicare con la centralina stradale ma presenza potenzialità ancora maggiori se coordinato a dovere con il sistema costituito dal platoon di camion.

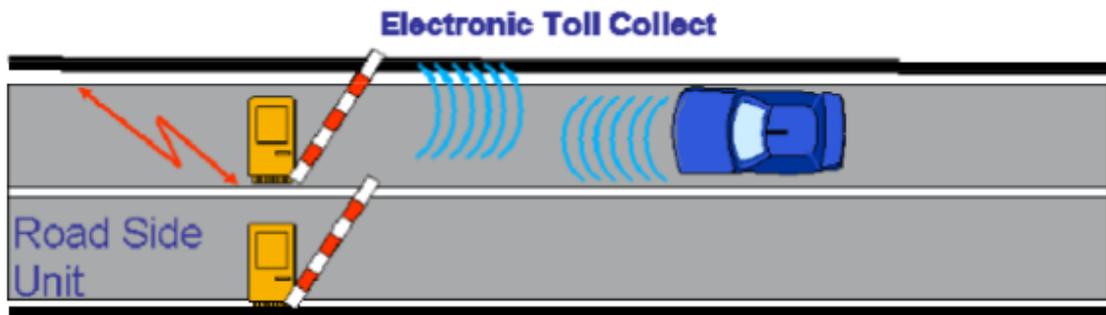


Figura 3.15: Electronic Toll Collect [76]

3.10 Conclusioni

Dopo aver caratterizzato il più precisamente possibile il funzionamento di una tecnologia ancora in evoluzione come il truck platooning, evidenziandone potenzialità e scenari problematici, se ne è descritta la probabile interazione con i principali servizi di mobilità cooperativa che saranno implementati sulla rete stradale europea nel 2019. Alla luce delle considerazioni effettuate, in questo paragrafo si cercherà di evidenziare quali siano i servizi Day 1 che racchiudono le maggiori potenzialità di entrare in sinergia con la tecnologia truck platooning, quali possano essere affidati alla comunicazione V2V e quali, invece, richiedano la presenza di centraline stradali in grado di assicurare una comunicazione V2I indipendentemente dalla presenza o meno di altri veicoli cooperativi. **Si evidenzia, inoltre, come una maggiore comunicazione tra il truck platoon e gli altri veicoli tramite canali V2V sia potenzialmente in grado di affrontare molte delle tematiche ancora aperte come manovre di merging, cut-ins adeguatamente sicuri ed interazioni alle rampe.** E' auspicabile quindi un approfondimento sulle potenzialità costituite dalle informazioni scambiate con altri veicoli cooperativi.

E' evidente come i benefici derivanti da un uso congiunto siano in grado di rendere più appetibili i business case sia dei Day 1 sia del truck platooning, essendo perfettamente implementabili a parità di equipaggiamento tecnologico a patto di garantire quell'interoperabilità nelle comunicazioni su cui, comunque, tutti gli stakeholders coinvolti sono d'accordo. Per enfatizzare quanto appena affermato si cita [8]:

“(...) a number of clear conclusions and recommendations were drawn from the analysis, as summarised below:

- *A small number of cost/benefit categories dominate the overall cost-effectiveness:*
 - *Two cost items make up over 96% of total costs estimated: the costs of the hardware required to support the deployment C-ITS services to vehicles make up c. 86% of total cumulative costs to 2030 in the central scenario, followed by aftermarket devices which make up c. 10% of total cumulative costs to 2030.*
 - *Three elements make up c. 99% of total cumulative benefits estimated: the biggest contributor is reduced travel times/increased efficiency (66% of cumulative benefits to 2030 in the central scenario), followed by reduced accident rates (22%) and fuel consumption savings (11%).*
- *There is a significant benefit from spreading initial investment costs across more services (...)*

Per massimizzare i benefici derivanti dall'uso congiunto delle due realtà, però, è auspicabile l'utilizzo di modelli di simulazione del traffico volti a quantificare i vari output in grado di definire gli impatti ed i prerequisiti per un'interazione ottimale tra truck platooning ed i C-ITS implementati (ad esempio la distanza minima di notifica della presenza di un veicolo di emergenza al platoon in prossimità di una rampa).

La tematica dell'interazione tra C-ITS Day 1 ed il truck platooning non sembra esser stata approfondita nella bibliografia disponibile, quindi non è ancora possibile definire parametri quantitativi secondo cui stilare una classifica in ordine di importanza. In questo paragrafo conclusivo ci si limita ad evidenziare quali di questi servizi siano safety critical e quali, invece, contribuiscono ad un utilizzo più efficiente dell'infrastruttura, quali abbiano la necessità di utilizzare la rete V2I e quali, invece, possano contare anche solo sulle comunicazioni V2V, avendo ben presente che, negli stadi iniziali dell'entrata sul mercato delle tecnologie cooperative, solo le comunicazioni V2I possono dirsi garantite in ogni situazione e fascia oraria (a patto di avere copertura del segnale su quel punto dell'infrastruttura).

C-ITS Day 1	Tipo di comunicazione	Safety critical	Simulazioni e temi da approfondire
Emergency Vehicle Approaching	V2V - V2I V2I necessaria	✓	Necessità di quantificare la distanza a cui fornire l'informazione al platoon, funzione di velocità e densità del traffico, valutare se disaggregare o regolare la velocità. Valutare se fornire l'informazione a tutti i veicoli formanti il platoon, necessità di definire una catena responsabilità e procedure certe
Emergency Electronic Brake Light (EEBL)	V2V	✓	Da valutare la casistica in cui il veicolo che frena è quello antecedente al veicolo che precede il platoon. Possibili vantaggi sul FCW da valutare, soprattutto in condizioni di flusso congestionato
Weather Conditions	V2V – V2I	— ¹⁰	Valutazione a livello nazionale e regionale dell'importanza di tale informazione, da cui dipende la possibilità di affidare il flusso di informazioni alle comunicazioni V2V o prevedere obbligatoriamente centraline per le comunicazioni V2I
Road Works Warning	V2V - V2I Necessità del V2I da valutare	—	Necessità di definire il quadro normativo sul numero di corsie utilizzabili da un platoon di veicoli pesanti. Definizione degli scenari di disaggregazione obbligatoria del platoon ed una catena di responsabilità. Implementazione del rerouting nei modelli di ottimizzazione
Probe Vehicle Data	V2I	—	Quantificazione del valore economico delle informazioni trasmesse al PSP, definizione degli impatti nel business case su scala nazionale.
Traffic Jam Ahead warning	V2V - V2I	—	Implementazione di queste informazioni nei modelli di ottimizzazione del traffico
Slow or Stationary Vehicle	V2V - V2I	✓	Implementazione di queste informazioni nei modelli di ottimizzazione del traffico, impatto sul rerouting e sulla formazione dei platoon
GLOSA	V2I	—	Simulazione degli impatti del GLOSA nelle varie realtà urbane pioniere dell'implementazione del truck platooning a livello urbano. Modellizzazione delle interazioni truck platooning – traffico urbano alle intersezioni.

¹⁰ Non si considera safety critical questo servizio C-ITS in quanto parzialmente ridondante rispetto tutti gli equipaggiamenti a bordo dei veicoli pesanti già in grado di fornire indicazioni sulla presenza di ghiaccio sul manto stradale

Day 1.5 ed oltre		
Cooperative Merging Assistance	V2I	— Fortemente dipendente dalla penetrazione nel mercato di veicoli cooperativi. Simulazione della manovra, dei gap necessari e del numero di veicoli C-ITS nel flusso principale in grado di garantire un buon livello di servizio alle rampe in funzione delle caratteristiche dei platoon
Electronic Toll Collect	V2I	— Quantificazione del tempo guadagnato ai caselli in funzione del numero di veicoli in un platoon

Tabella 3-1: C-ITS Day 1 & Truck Platooning - Sintesi

Nella tabella 3-1 si è cercato di riassumere le principali caratteristiche e tematiche da affrontare per ognuno dei C-ITS analizzati in linea generale. Molti di questi infatti assumono rilevanza e diversi livelli di importanza al variare della regione geografica di riferimento e delle caratteristiche della rete stradale considerata. Si è cercato, comunque, di elencarli in ordine dal più al meno impattante (rispettivamente Emergency vehicle approaching e GLOSA) dal punto di vista economico e sociale in un orizzonte temporale ristretto, in linea con l'implementazione dei Day 1.

E' necessario far notare come, per i servizi utilizzando la comunicazione V2I, gli orizzonti temporali siano fortemente variabili su scala nazionale o anche solo regionale. In Olanda ad esempio la presenza di centraline stradali in grado di fornire i servizi C-ITS Day 1 sembra già una realtà in via di consolidazione, così come le sperimentazioni riguardanti l'implementazione dei C-ITS su strade pubbliche. In Italia invece il numero di sperimentazioni in questo campo è molto inferiore così come lo sono le infrastrutture opportunamente attrezzate. Nelle realtà meno al passo con i tempi di implementazione ipotizzati, quindi, è presumibile che i servizi basati sulle comunicazioni V2I diventino disponibili con orizzonti temporali diversi e difficilmente prevedibili perché fortemente basati su volontà politiche e realtà territoriali diverse. I servizi V2V, invece, risultano evidentemente soggetti ai livelli di penetrazione nel mercato di veicoli equipaggiati, anche in questo caso quindi le tempistiche risultano fortemente variabili in funzione del mercato automobilistico nazionale e del rinnovo del parco veicolare sul suolo europeo.

Oltre alle tematiche riguardanti la necessità di procedure certe nei casi che possono comportare un impatto sull'incolumità degli altri utenti della strada (vedasi emergency vehicle approaching e road hazards warning) è necessario valutare un altro aspetto fondamentale. All'aumentare del flusso di informazioni rilevabili e ricevibili da un platoon formato da veicoli pesanti, quali di queste devono essere trasmesse al conducente del leading vehicle e quali devono arrivare ai following vehicle. La tematica dell'affaticamento del conducente, infatti, è sempre più rilevante e, se da un lato il truck platooning è in grado di alleggerire il carico di lavoro legato agli aspetti meccanici della guida, dall'altro è possibile che un numero elevato di informazioni porti ad un affaticamento mentale altrettanto deleterio. Appare necessario valutare, inoltre, se sia possibile che diversi C-ITS inviino informazioni alcuni sul cellulare ed altri sull'interfaccia HMI e come questo possa impattare sulla qualità di guida. Per ridurre al minimo queste problematiche è necessario valutare molto attentamente quali delle molteplici informazioni che sfrutteranno le connessioni ITS debbano essere comunicate ed a chi. E' auspicabile, inoltre, definire una catena di comando all'interno dello stesso platoon, soprattutto nell'ipotesi che non tutte le informazioni siano trasmesse ai following vehicle. Nella bibliografia attuale, inoltre, si segnala una mancanza di studi sulla distrazione che i dispositivi mobili possono provocare nei conducenti di veicoli pesanti.

“Differences in vehicles are underrepresented in the literature, and only one article to date has reported the effects of distraction for the drivers of commercial motor vehicles like heavy trucks and buses (Hickman and Hanowski, 2012)” [45]

E' quindi auspicabile un approfondimento che tenga conto delle peculiarità del lavoro del conducente di veicoli pesanti ed, inoltre, simuli l'interazione tra il conducente e l'HMI, il cellulare o entrambi nel flusso di informazioni maggiore riconducibile al truck platooning ed ai C-ITS appena citati. Si riporta di seguito una tabella con le informazioni considerate imprescindibili correlate ai C-ITS Day 1 e l'opportunità che giungano solo al conducente del Leading Vehicle o anche ai Following Vehicles (nell'ipotesi di livello di automazione L2).

C-ITS Day 1	Informazioni di base	Destinatario dell'informazione
Emergency Vehicle Approaching	Distanza del veicolo dalla rampa e dal platoon, tempo stimato di arrivo alla rampa	LV che ordina la disaggregazione
Emergency Electronic Brake Light	Frenata di emergenza	LV
Weather Conditions	Tipo di avversità meteo, valore dell'headway da tenere	LV – FV
Road Works Warning	Numero di corsie chiuse, lunghezza del cantiere, distanza del cantiere	LV – FV
Traffic Jam Ahead warning	Distanza dall'inizio della coda, lunghezza delle code, possibili percorsi alternativi	LV – FV
Slow or Stationary Vehicle	Distanza dal veicolo in oggetto, necessità di rerouting, modifica del punto di merging	LV – FV
GLOSA	Velocità consigliata, necessità di disaggregazione del platoon	LV
Day 1.5 ed oltre		
Cooperative Merging Assistance	Possibilità di immissione o necessità di disfacimento ¹¹	LV
Electronic Toll Collect	Costo del pedaggio, segnale di avvenuto pagamento da parte di tutti i veicoli facenti parte del platoon	LV

Tabella 3-2: Necessità di comunicazione

¹¹ La necessità di disfacimento può essere determinata in funzione del numero di veicoli a guida coordinata rilevati nel flusso principale. Necessità di simulazioni al riguardo in funzione di diversi flussi di traffico e diverse caratteristiche geometriche dell'infrastruttura.

Bibliografia

- [1] Insight - Platooning towards sustainable road freight transport. Sia partners 2016.
- [2] D4: Common Vision regarding cooperative systems FOTs. FESTA deliverables, 2008.
- [3] Comunicazione dalla Commissione al Parlamento Europeo del 30/11/2016 - A European strategy on Cooperative Intelligent Transport Systems, a milestone towards cooperative, connected and automated mobility. eur-lex.europa.eu 2016.
- [4] Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio 2010/40/UE del 7 Luglio, sul quadro generale per la diffusione dei sistemi di trasporto intelligenti nel settore del trasporto stradale e nelle interfacce con altri modi di trasporto. eur-lex.europa.eu 2010.
- [5] ADARLO, S., Maggio 25, 2017, , The andlinger center speaks: is the driverless car good for the environment?. Available: <http://acee.princeton.edu/acee-news/the-andlinger-center-speaks-is-the-driverless-car-good-for-the-environment/> [Agosto 10, 2017].
- [6] ADOLFSON, M., Business models and commercialisation, , SCANIA final conference at the Applus IDIADA Technical Centre, 2016.
- [7] ANDERSSON, JONAS, ENGLUND, CRISTOFER, VORONOV, ALEXEY, Strategiska innovationsprogrammet Drive Sweden, 2017. Study of communication needs in interaction between trucks and surrounding traffic in platooning.
- [8] ASSELIN-MILLER, N., BLEDKA, M., GIBSON, G., KIRSCH, F., HILL, N., WHITE, B. and UDDIN, K., European Commission - Febbraio 5, 2016. Study on the Deployment of C-ITS in Europe: Final Report.
- [9] BERGENHEM, C., HEDIN, E. and SKARIN, D., 2012. Vehicle-to-Vehicle Communication for a Platooning System. Procedia - Social and Behavioral Sciences; Transport Research Arena 2012, 48, pp. 1222-1233.
- [10] BERGENHEM, C., HUANG, Q., BENMIMOUN, A. and ROBINSON, T., 2017. Challenges Of Platooning On Public Motorways.
- [11] BRIZZOLARA, D. and TOTH, A., 2016. The emergence of truck platooning. Baltic Transport Journal, , pp. 58-59.
- [12] CHEN, L. and ENGLUND, C., 2014. Cooperative ITS - EU standards to accelerate cooperative mobility.
- [13] C-ITS PLATFORM, Settembre 2017. Final report Phase II.
- [14] CORNELISSEN, J., 2017. Creating next generation mobility - European Real Life Cases Truck Platooning, 2017 - 2019, 2017.
- [15] CORNELISSEN, J. and JANSSEN, R., Marzo 21, 2017. Truck Platooning Real-Life Cases NL - Update for EU Truck Platooning Network Meeting, Marzo 21, 2017.
- [16] CULLERN, D., MARSILI, F., WHITE, J., PENTTINEN, M., TAALE, H., RAFFAILLAC, J., FLECHL, B., MAINARDI, P. and PAVEL, F., C-ROAD 2015. Definition of evaluation KPI for ITS deployment.

- [17] DAIMLER, Settembre 02, 2017, , Connected Trucks, freight transport of the future by using the internet. Available: <https://www.daimler.com/innovation/digitalization/connectivity/connectedtrucks.html> [Ottobre 15, 2017].
- [18] DAZIANO, R.A., SARRIAS, M. and LEARD, B., 2017. Are consumers willing to pay to let cars drive for them? Analyzing response to autonomous vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 78, pp. 150-164.
- [19] DENG, Q., 2016. Heavy-Duty Vehicle Platooning : Modeling and Analysis, KTH Royal Institute of Technology.
- [20] DEPARTMENT FOR TRANSPORT and CENTRE FOR CONNECTED AND AUTONOMOUS VEHICLES (UK), 2015. Automated vehicle technologies testing: code of practice.
- [21] DOGAN, E., RAHAL, M., DEBORNE, R., DELHOMME, P., KEMENY, A. and PERRIN, J., 2017. Transition of control in a partially automated vehicle: Effects of anticipation and non-driving-related task involvement.
- [22] DUAN, Y., LV, Y., LIU, Y. and WANG, F., 2016. An efficient realization of deep learning for traffic data imputation.
- [23] E. VAN NUNEN, F. ESPOSTO, A. K. SABERI and J. P. PAARDEKOOOPER, 2017. Evaluation of safety indicators for truck platooning, 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) 2017, pp. 1013-1018.
- [24] ECKHARDT, J., VAN VILET, A., AARTS, L. and ALKIM, T., European Truck Platooning 2016. European Truck Platooning Challenge 2016 - Creating next generation mobility - Lesson Learnt, European Truck Platooning 2016.
- [25] ERTRAC WORKING GROUP - CONNECTIVITY AND AUTOMATED DRIVING, Maggio 29, 2017. Automated Driving Roadmap.
- [26] FLAMENT, M., SCANIA final conference at the Applus IDIADA Technical Centre 2016. Truck Platooning Next Steps, SCANIA final conference at the Applus IDIADA Technical Centre 2016.
- [27] GORDON, M., G., Auburn University 2015. Evaluation of Driver Assistive Truck Platooning on Traffic Flow.
- [28] HABOUCHA, C.J., ISHAQ, R. and SHIFTAN, Y., 2017. User preferences regarding autonomous vehicles.
- [29] HALL, R.W. and LI, C., 2001. Evaluation of Priority Rules for Entrance to Automated Highways. *ITS Journal - Intelligent Transportation Systems Journal*, 6(2), pp. 175-193.
- [30] HARPER, C.D., HENDRICKSON, C.T., MANGONES, S. and SAMARAS, C., 2016. Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions.
- [31] HOOK, L., Giugno 05, 2017. How driveless cars are set to reinvent and humanise our streets. www.todayonline.com/print/2617391 edn.
- [32] J. C. ZEGERS, E. SEMSAR-KAZEROONI, M. FUSCO and J. PLOEG, 2017. A multi-layer control approach to truck platooning: Platoon cohesion subject to dynamical limitations, 2017 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS) 2017, pp. 128-133.

- [33] J. LARSON, K. Y. LIANG and K. H. JOHANSSON, 2015. A Distributed Framework for Coordinated Heavy-Duty Vehicle Platooning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(1), pp. 419-429.
- [34] J. RIOS-TORRES and A. A. MALIKOPOULOS, 2017. A Survey on the Coordination of Connected and Automated Vehicles at Intersections and Merging at Highway On-Ramps. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(5), pp. 1066-1077.
- [35] JANSSEN, R., ZWIJNENBERG, H., BLANKERS, I. and DE KRUIJFF, J., TNO - Innovation for life, Febbraio 2015. Truck Platooning - Driving the future of transportation.
- [36] K. Y. LIANG, J. MÅRTENSSON and K. H. JOHANSSON, 2014. Fuel-saving potentials of platooning evaluated through sparse heavy-duty vehicle position data, 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings 2014, pp. 1061-1068.
- [37] K. Y. LIANG, Q. DENG, J. MÅRTENSSON, X. MA and K. H. JOHANSSON, 2015. The influence of traffic on heavy-duty vehicle platoon formation, 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) 2015, pp. 150-155.
- [38] KLEIN, I. and BEN-ELIA, E., 2016. Emergence of cooperation in congested road networks using ICT and future and emerging technologies: A game-based review.
- [39] LARBURU, M., SANCHEZ, J. and JOSÃ© RODRIGUEZ, D., 2010. SAFE ROAD TRAINS FOR ENVIRONMENT: Human factors' aspects in dual mode transport systems.
- [40] LERVÅG, L., NordicWay, Marzo 11, 2016. Evaluation Handbook.
- [41] LIANG, K., VAN DE HOEF, S., TERELIUS, H., TURRI, V., BESSELINK, B., MÅRTENSSON, J. and JOHANSSON, K.H., 2016. Networked control challenges in collaborative road freight transport.
- [42] MAURO, V., DALLA CHIARA, B., DEFLORIO, F., CARBONI, A. and COSSU, F., 71a Conferenza del Traffico e della Circolazione ACI, 2017. AUTO-MATICA - Il futuro prossimo dell'auto: Connettività e automazione, , Giugno 13, 2017 71a Conferenza del Traffico e della Circolazione ACI, 2017.
- [43] MOHD ZULKEFLI, M.A., MUKHERJEE, P., SUN, Z., ZHENG, J., LIU, H.X. and HUANG, P., 2017. Hardware-in-the-loop testbed for evaluating connected vehicle applications.
- [44] NETTEN, B. and WILMINK, I., InterCor, 2016. First version for Day 1 services.
- [45] OVIEDO-TRESPALACIOS, O., HAQUE, M.M., KING, M. and WASHINGTON, S., 2016. Understanding the impacts of mobile phone distraction on driving performance: A systematic review.
- [46] PAYNE, S., AECOM, 2015. Key performance indicators for intelligent transport systems - Final Report.
- [47] PETTERSSON, H., 2016. On-Board System for Truck Platoons, , Scania final conference at the Applus IDIADA Technical Centre, 2016 2016.
- [48] Q. JIN, G. WU, K. BORIBOONSOMSIN and M. BARTH, 2012. Multi-Agent Intersection Management for Connected Vehicles Using an Optimal Scheduling Approach, 2012 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE) 2012, pp. 185-190.

- [49] R. HULT, G. R. CAMPOS, E. STEINMETZ, L. HAMMARSTRAND, P. FALCONE and H. WYMEERSCH, 2016. Coordination of Cooperative Autonomous Vehicles: Toward safer and more efficient road transportation. *IEEE Signal Processing Magazine*, 33(6), pp. 74-84.
- [50] S. ELLWANGER and E. WOHLFARTH, 2017. Truck platooning application, 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) 2017, pp. 966-971.
- [51] S. VAN DE HOEF, K. H. JOHANSSON and D. V. DIMAROGONAS, 2015. Fuel-optimal centralized coordination of truck platooning based on shortest paths, 2015 American Control Conference (ACC) 2015, pp. 3740-3745.
- [52] SAMARAS, Z., NTZIACHRISTOS, L., BURZIO, G., TOFFOLO, S., TATSCHL, R., MERTZ, J. and MONZON, A., 2012. Development of a Methodology and Tool to Evaluate the Impact of ICT Measures on Road Transport Emissions. *Procedia - Social and Behavioral Sciences; Transport Research Arena 2012*, 48, pp. 3418-3427.
- [53] SCHEIBLICH, C. and RAITH, T., Mercedes-Benz, 2014. The Extended Vehicle (ExVe) - New Standardization Project ISO, , Bruxelles, Novembre 27, 2014 Mercedes-Benz, 2014.
- [54] SHEN, S. and NEYENS, D.M., 2017. Assessing drivers' response during automated driver support system failures with non-driving tasks.
- [55] STERN, R.,E., CUI, S., DELLE MONACHE, M.L., BHADANI, R., BUNTING, M., CHURCHILL, M., HAMILTON, N., HAULCY, R., POHLMANN, H., WU, F., PICCOLI, B., SEIBOLD, B., SPRINKLE, J. and WORK, D., 2017. Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles: Field experiments.
- [56] SWEATMAN, P., ITF 2017. Evolution of Technology for Commercial Vehicle Safety, , Roundtable on Commercial Vehicle On-Board Safety Systems 5-6, 01, 2017 ITF 2017.
- [57] TAALE, H., C-ROAD 2015. EIP Evaluation - Template for Reporting Evaluation Results (Full).
- [58] TABIBI, M., 2004-07-01. Design and Control of Automated Truck Traffic at Motorway Ramps. doctoral thesis edn. Tuedelft.
- [59] TIERNAN, T., RICHARDSON, N., AZEREDO, P., NAJM, W.,G. and LOCHRANE, T., 2017. Test and evaluation of vehicle platooning proof-of-concept based on cooperative adaptive cruise control. John A. Volpe National Transportation Systems Center (U.S.).
- [60] TNO - INNOVATION FOR LIFE, European Truck Platooning Conference, Aprile 7, 2016. Truck Platooning Vision 2025, European Truck Platooning Conference, Aprile 7, 2016.
- [61] TRIMBLE, T., E., BISHOP, R., MORGAN, J., F. and BLANCO, M., NHTSA 2014. Human Factors Evaluation of Level 2 and Level 3 Automated Driving Concepts: Past Research, State of Automation Technology and Emerging System Concepts.
- [62] VAN, D.H., 2016. Fuel-Efficient Centralized Coordination of Truck Platooning, KTH Royal Institute of Technology.
- [63] VLASSENROOT, S., DEFREYNE, P., VAN DER WEE, M., BAHREINI, S., BOONEN, J., BACKX, K. and VALGAEREN, K., 2016. Roadmap mobility DATA warehous - current & future use of mobility DATA.
- [64] VLASSENROOT, S.H.M., 2011. The Acceptability of In-vehicle Intelligent Speed Assistance Systems: from Trial Support to Public Support, TRAIL Research School.

- [65] WANG, J., WU, J., ZHENG, X., NI, D. and LI, K., 2016. Driving safety field theory modeling and its application in pre-collision warning system.
- [66] WANG, R., LI, Y. and WORK, D.B., 2017. Comparing traffic state estimators for mixed human and automated traffic flows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 78, pp. 95-110.
- [67] WILL, D., ZLOCKI, A. and ECKSTEIN, L., 2012. Detailed FOT for the Analysis of Effects between Nomadic Devices and ADAS. *Procedia - Social and Behavioral Sciences; Transport Research Arena 2012*, 48, pp. 2003-2011.
- [68] WUTTKE, W., Giugno 21, 2016, , The digital future of the truck. Available: <https://www.daimler.com/innovation/next/the-digital-future-of-the-truck.html> [Settembre 2, 2017].
- [69] WUTTKE, W., , Platooning: birds as a role model. Available: <https://www.daimler.com/innovation/next/platooning-birds-as-a-role-model.html> [Settembre 7, 2017].
- [70] YANG, H. and JIN, W., 2016. Instantaneous communication capacities of vehicular ad hoc networks.
- [71] YANG, K., GULER, S.I. and MENENDEZ, M., 2016. Isolated intersection control for various levels of vehicle technology: Conventional, connected, and automated vehicles.
- [72] ZABAT, M., BROWAND, F., PARTNERS FOR ADVANCED TRANSIT, AND HIGHWAYS, FRASCAROLI, S., UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY INSTITUTE OF, TRANSPORTATION STUDIES, UNIVERSITY OF, S.C. and STABILE, N., 1995. The Aerodynamic Performance of Platoons. Final Report. California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California.
- [73] C-ITS PLATFORM, Settembre, 2017. *Phase II - Cooperative Intelligent Transport Systems towards Cooperative, Connected and Automated Mobility - Final report*.
- [74] C-ITS PLATFORM, Gennaio, 2016. *Final report*.
- [75] GEAR 2030 - High Level Group on the Competitiveness and Sustainable Growth of the Automotive Industry in the European Union - Final Report. European Commission - Ottobre 2017.
- [76] ETSI TECHNICAL COMMITTEE INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEM, 2009. ETSI TR 102 638 v1.1.1 (2009-06).
- [77] Connecting vehicles for safe, comfortable and green driving on Europe. Accelerate cooperative mobility, DRIVE C2X. Available: <http://www.drive-c2x.eu> [Novembre 06, 2017].
- [78] MAILE, M., 2009, SAE. Vehicle Safety Communications - Applications (VSC-A) Project: Crash Scenarios and Safety Applications.
- [79] C-ROADS, Luglio, 2017. Working Group 2, Task Force two Common C-ITS Service Definitions. Draft v0,3. Vienna
- [80] TURNER, S., M., EISELE, W., L. and BENZ, R., J., HOLDENER, J., D., 1998. Travel Time Data Collection Handbook. Ch. 5

- [81] BUSSE, K., T., 2017. A functional combination of platooning and traffic-adaptive intersection control.
- [82] Compass4D - Piloting Cooperative Services for Deployment. 2015, Ertico
- [83] ACEA Position Paper - Access to vehicle data for third-party services. Dicembre, 2016.
- [84] SCANIA, Gennaio, 2017. PRESS INFO - Scania takes lead with full-scale autonomous truck platoon.
- [85] GHEORGHIU, A., IORDACHE, V. and CORMOS, A., 2017. Cooperative Communication Network for Adaptive Truck Platooning.
- [86] SMITH, D., A., 2016. Modeling and understanding the implications of future truck technology scenarios for performance-based freight corridor planning
- [87] LAMMERT , M.P., DURAN , A., DIEZ , J., BURTON , K. and NICHOLSON , A., 2014. Effect of Platooning on Fuel Consumption of Class 8 Vehicles Over a Range of Speeds, Following Distances, and Mass. SAE Int.J.Commer.Veh., **7**(2), pp. 626-639
- [88] URSA MAJOR 2 Stakeholders workshop on DATEX II Ottobre 24, 2017-last update. Available: <http://ursamajor.its-platform.eu/highlights/ursa-major-2-stakeholder-workshop-datex-ii> [Novembre 13, 2017].
- [89] LU, X. and SHLADOVER, S., E., 2014. Automated Truck Platoon Control and Field Test. In: S.B. GEREON MEYER, ed, Lecture Notes in Mobility. Springer, pp. 247-261.