



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Dottorato di Ricerca in Energia

Indirizzo: Tecnica ed Economia dei Trasporti

Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici

S.S.D. ICAR/05

## TECNICHE INNOVATIVE DI MONITORAGGIO DEL TRAFFICO PER IL MIGLIORAMENTO DEL SISTEMA DELLA MOBILITÀ DI PERSONE E MERCI

IL DOTTORE  
**ING. ALESSANDRO SCORDO**

IL COORDINATORE  
**PROF. ALDO ORIOLI**

IL TUTOR  
**PROF. GIUSEPPE SALVO**



# INDICE

**INDICE..... pag. 3**

**INTRODUZIONE ..... pag. 7**

**CAPITOLO 1 - Il ruolo degli ITS nella gestione dei trasporti..... pag. 10**

1.1 Introduzione..... pag. 10

1.2 I Sistemi di Trasporto Intelligenti (ITS) ..... pag. 12

1.3 Il quadro normativo europeo di riferimento ..... pag. 14

1.3.1 Il libro Bianco sui Trasporti ..... pag. 14

1.3.2 Il Piano di Azione per la diffusione degli ITS in Europa ..... pag. 15

1.3.3 La Direttiva 2010/40/EU ..... pag. 16

1.4 La normativa nazionale..... pag. 17

1.4.1 Il Piano Generale dei Trasporti e della Logistica (PGTL)..... pag. 18

1.4.2 Le Linee Guida del Piano Generale della Mobilità (PGM)..... pag. 18

1.4.3 Il Decreto Legge 179/2012 ..... pag. 19

1.4.4 Il Piano di Azione Nazionale sugli ITS ..... pag. 20

1.4.5 Il Nuovo Codice della Strada..... pag. 23

1.5	Riferimenti bibliografici .....	pag. 24
-----	---------------------------------	---------

## **CAPITOLO 2 - La gestione del traffico: modelli e monitoraggio.....pag. 26**

2.1	Introduzione .....	pag. 26
2.2	I modelli di simulazione del traffico.....	pag. 27
2.2.1	I modelli microscopici .....	pag. 28
2.2.2	Modelli macroscopici .....	pag. 31
2.2.3	Modelli mesoscopici.....	pag. 34
2.3	Progettazione di un sistema di monitoraggio del traffico.....	pag. 35
2.3.1	Oggetto e finalità .....	pag. 36
2.3.2	Ambiti del monitoraggio e calendario raccolta dati .....	pag. 37
2.3.3	Gestione ed interpretazione delle informazioni acquisite.....	pag. 38
2.4	Riferimenti bibliografici .....	pag. 39

## **CAPITOLO 3 - Tecniche di rilevamento tradizionali dei dati di traffico..... pag. 41**

3.1	Introduzione.....	pag. 41
3.2	Tecniche di rilevamento manuale.....	pag. 42
3.2.1	Il rilevamento con il metodo dell'osservatore fisso.....	pag. 42
3.2.2	Il rilevamento con il metodo dell'osservatore mobile .....	pag. 44
3.3	Tecniche di rilevamento con sistemi automatici .....	pag. 45
3.3.1	Il rilevamento con tubi pneumatici .....	pag. 47
3.3.2	Il rilevamento con cavi triboelettrici.....	pag. 48
3.3.3	Il rilevamento con spire induttive .....	pag. 49
3.3.4	Il rilevamento con sensori piezoelettrici.....	pag. 50
3.3.5	Il rilevamento con sensori magnetodinamici .....	pag. 52
3.3.6	Il rilevamento con sensori a microonde.....	pag. 54
3.3.7	Il rilevamento con sensori a raggi infrarossi.....	pag. 55
3.3.8	Il rilevamento con sensori acustici .....	pag. 57
3.3.9	Comparazione tra i differenti sistemi automatici.....	pag. 58
3.4	Riferimenti bibliografici .....	pag. 59

**CAPITOLO 4 - Nuove tecniche di rilevamento dei dati di traffico .....pag. 60**

4.1	Introduzione.....	pag. 60
4.2	Il rilevamento con fotografia aerea.....	pag. 61
4.3	Il rilevamento con immagini video.....	pag. 63
4.4	Il rilevamento con veicoli sonda.....	pag. 69
4.5	Il rilevamento attraverso informazioni reperibili sul WEB .....	pag. 73
4.5.1	L'applicazione Traffico di Google Maps .....	pag. 73
4.5.2	L'applicazione Infoblu Traffic .....	pag. 75
4.5.3	L'applicazione social Waze.....	pag. 76
4.6	Riferimenti bibliografici .....	pag. 77

**CAPITOLO 5 - L'impiego dei SAPR per il monitoraggio del traffico.....pag. 80**

5.1	Introduzione.....	pag. 80
5.2	I Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR).....	pag. 81
5.2.1	Cenni storici.....	pag. 81
5.2.2	Classificazione.....	pag. 83
5.2.3	Multi-rotori e droni ad ala fissa .....	pag. 84
5.2.4	Componenti elettronici .....	pag. 88
5.2.4	Aspetti normativi relativi all'utilizzo dei SAPR.....	pag. 90
5.3	Principali campi applicativi nell'ambito dell'ingegneria .....	pag. 94
5.3.1	Prodotti cartografici.....	pag. 94
5.3.2	Rilievo dei beni culturali .....	pag. 96
5.3.3	Ispezioni di impianti ed infrastrutture.....	pag. 96
5.3.4	Altre applicazioni.....	pag. 98
5.4	Riferimenti bibliografici .....	pag. 99

**CAPITOLO 6 – Strumentazione utilizzata e metodologia proposta .....pag. 101**

6.1	Introduzione.....	pag. 101
6.2	I SAPR utilizzati .....	pag. 101

6.2.1	Drone AirVision NT4-contras .....	pag. 103
6.2.2	Drone Aibotix X6 .....	pag. 104
6.3	Veicolo sonda equipaggiato con un GPS differenziale .....	pag. 106
6.4	Metodologia di rilevamento dei flussi di traffico .....	pag. 107
6.4.1	Realizzazione del rilievo in pieno campo .....	pag. 107
6.4.2	Processamento del video.....	pag. 109
6.4.3	Stima delle grandezze cinematiche di interesse.....	pag. 114
<b>CAPITOLO 7 – Applicazioni sperimentali .....</b>		<b>pag. 115</b>
7.1	Introduzione.....	pag. 115
7.2	Rilievi in pieno campo.....	pag. 115
7.3	Principali risultati ottenuti .....	pag. 119
7.3.1	Tracciamento dei veicoli ed individuazione delle traiettorie.....	pag. 119
7.3.2	Stima del flusso e della velocità media.....	pag. 121
7.3.3	Comparazione tra i profili di velocità del veicolo sonda.....	pag. 123
7.3.4	Valutazione del gap acceptance.....	pag. 126
7.3.5	Determinazione della matrice O/D .....	pag. 131
7.3.6	Individuazione di comportamenti scorretti alla guida .....	pag. 132
<b>CONCLUSIONI .....</b>		<b>pag. 133</b>

## INTRODUZIONE

La presente tesi di Dottorato è stata redatta dall'Ing. Alessandro Scordo a conclusione delle attività di ricerche svolte nell'ambito del XXVI° Ciclo del Dottorato di Ricerca in "Energia", indirizzo "Tecnica ed Economia dei Trasporti" svoltosi nel triennio 2013-2015 presso il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici dell'Università degli Studi di Palermo.

L'attività di ricerca, realizzate sotto la supervisione del Docente Tutor Prof. Ing. Giuseppe Salvo che si ringrazia sentitamente per il tempo dedicato e per il supporto scientifico fornito, sono state finalizzate all'analisi ed all'individuazione di tecniche innovative di monitoraggio del traffico che, se utilizzate ad integrazione di quelle più tradizionali e affermate sia dal punto di vista scientifico e metodologico, hanno il compito di fornire e mantenere aggiornati i dati sulla consistenza dei flussi di traffico e raccogliere informazioni sui comportamenti di guida dei conducenti, necessari per affrontare e risolvere criticità localizzate lungo la rete stradale.

La fase sperimentale della ricerca è stata finalizzata a verificare la possibilità di utilizzare i Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR), ossia degli aeromobili caratterizzati dall'assenza di un equipaggio a bordo anche conosciuti con il termine "droni" o con alcuni acronimi di origine inglese (es: UAV, Unmanned Aerial Vehicle), possono essere utilizzati

anche come un valido strumento di monitoraggio del traffico. Tale tipologia di strumentazione è già ampiamente utilizzata da alcuni anni in altri settori dell'ingegneria civile e, rispetto ad altre tipologie di strumentazioni, risulta essere di tipo non invasiva ed applicabile in molti contesti anche di tipo urbano.

Gli argomenti affrontati nel corso delle attività di ricerca svolta dallo scrivente sono stati strutturati in sette capitoli. Nel primo capitolo viene introdotto il problema della gestione del traffico, soprattutto in prossimità delle grandi città dove il traffico urbano spesso si combina con quello legato al trasporto delle merci ed agli spostamenti di lunga percorrenza; nel corso del capitolo sono stati descritti i Sistemi di Trasporto Intelligenti (ITS), i loro riferimenti normativi e le azioni generali da attivare per favorire lo sviluppo di tali sistemi a livello nazionale.

Nel secondo capitolo si sono analizzati i modelli matematici messi a punto nel corso del tempo in grado di effettuare analisi precise ed accurate del traffico e della sua evoluzione nel tempo; inoltre, sono stati trattati gli aspetti legati alla progettazione di un sistema di monitoraggio dei flussi di traffico.

Nel terzo capitolo vengono esaminate le tecniche tradizionali di rilevamento dei dati del traffico che offrono l'indubbio vantaggio di consentire misure prolungate nel tempo e con un buon livello di affidabilità ma che, di contro, sono adatte al rilievo di pochi specifici parametri del deflusso e di avere un dominio spaziale di analisi piuttosto ridotto.

Nel quarto capitolo vengono trattate le tecniche di rilevamento dei dati di traffico basate sull'uso della tecnologia per la gestione ed il trattamento delle informazioni; in particolare, sono state descritte quelle che prevedono l'utilizzo di fotografie aeree, di sequenze video acquisite da videocamere posizionate lungo la carreggiata e di veicoli sonda immessi nella corrente di traffico che si intende analizzare. Infine, sono state descritte anche alcune tipologie di informazioni reperibili dal WEB che, se pur fornendo solamente delle informazioni di tipo qualitativo, possono essere di grande aiuto per la comprensione e l'evoluzione legate alla dinamica del traffico.

Il capitolo cinque è dedicato ai SAPR: dopo una breve descrizione sulla loro origine ed evoluzione nel tempo, vengono descritte le principali caratteristiche e le peculiarità dei droni impiegati in ambito civile. Successivamente, vengono brevemente descritti sia i principali campi applicativi nell'ambito dell'ingegneria che quelli relativi alle problematiche dei trasporti; infine, vengono brevemente trattati gli aspetti legislativi che disciplinano il loro utilizzo.



Nel sesto capitolo vengono descritte le caratteristiche principali delle strumentazioni utilizzate per la realizzazione delle attività sperimentale e la metodologia messa a punto per effettuare la rilevazione dei flussi di traffico veicolare attraverso l'acquisizione di un video acquisito dall'alto da un drone in volo. A seguire, nel capitolo sette, sono stati presentati i principali risultati ottenuti analizzando con la metodologia precedentemente descritta i video acquisiti durante alcune applicazioni sperimentali effettuate.

Infine, a conclusione del presente elaborato, vi sono alcune considerazioni in merito ai risultati ottenuti, alla metodologia presentata ed alle possibili evoluzioni, soprattutto finalizzata all'automatizzazione di alcune parti dell'elaborazione dei video acquisiti da SAPR.

# CAPITOLO 1

## Il ruolo degli ITS nella gestione dei trasporti

### 1.1 Introduzione

Negli ultimi decenni si è assistito ad una profonda modifica strutturale dei modelli di domanda di trasporto, sia per quanto riguarda lo spostamento di persone che per le merci. Nel primo caso si è passati dal tradizionale modello di mobilità “a spostamento singolo”, nel quale il viaggio aveva come origine e destinazione il domicilio, ad un approccio “a spostamenti multipli”, dove un viaggio tipo è costituito da un insieme concatenato di trasferimenti. Per quanto riguarda il trasporto delle merci, invece, si è verificata una variazione nella struttura spaziale e comportamentale della domanda di trasporto causata dal passaggio da un’economia di “stock” ad un’economia “di flusso”, dalla delocalizzazione sul territorio degli insediamenti produttivi e dagli effetti derivanti la maggiore estensione dei mercati.

Tali fenomeni, indubbiamente legati allo sviluppo economico ed al numero sempre crescente di autoveicoli in transito, hanno portato ad un graduale incremento dei fenomeni di congestione e di conseguenza ad un crescente aumento dei tempi di viaggio, degli incidenti stradali e dei problemi ambientali legati all’inquinamento, soprattutto in prossimità delle grandi città dove il traffico urbano spesso si combina con quello legato al trasporto delle merci ed agli spostamenti di lunga percorrenza.

Inoltre, i trend previsti dalle nazioni unite (United Nations Economic Commission for Europe, 2012) per il medio-lungo periodo indicano che globalizzazione e crescita demografica determineranno una domanda di trasporto che eccederà le attuali capacità dei sistemi di trasporto. In particolare:

- il modello di sviluppo socio-economico mondiale sarà sempre più urbano-centrico: entro il 2050 oltre il 60% della popolazione mondiale vivrà nelle città, i centri urbani produrranno oltre l'80% del PIL, il tasso di motorizzazione esploderà con un aumento tra il 250 e il 375%;
- a seguito anche dello spostamento degli assi di potere economico e politico entro il 2050, secondo le previsioni i passeggeri x km globali saranno triplicati e il traffico merci sarà quattro volte più elevato dell'attuale;
- entro il 2030, nel mondo, 27 città supereranno i 10 milioni di abitanti rispetto alle 19 attuali.

Per cercare di minimizzare tali problematiche, che tra le altre cose comportano un incremento dei costi sociali e conseguentemente un abbassamento della qualità della vita, sono state trovate nel corso del tempo alcune soluzioni, che consistono nel:

- disincentivare l'utilizzo dei mezzi privati in ambito urbano attraverso il miglioramento dei servizi di trasporto pubblico collettivo e il potenziamento della mobilità ciclabile e dei servizi di car-sharing e bike-sharing;
- realizzare nuove strade o aumentare la capacità delle arterie stradali già esistenti con l'aggiunta per esempio di nuove corsie; soluzioni che, seppur molto efficaci, richiedono spesso investimenti economici elevati, forti impatti ambientali e lunghi periodi per la realizzazione, che non sempre sono giustificati dal momento in cui la capacità delle strade risulta essere insufficiente solo in determinate circostanze (limitate fasce orarie della giornata, eventi meteorologici avversi, periodi prefestivi, ecc.);
- ottimizzare l'uso delle infrastrutture presenti sul territorio per cercare di ridurre la formazione di ingorghi e di rallentamenti attraverso la realizzazione di studi finalizzati alla modellizzazione del deflusso veicolare, con lo scopo di creare strumenti in grado di gestire e progettare adeguatamente il sistema dei trasporti e di migliorare le condizioni di sicurezza di guida.

Tralasciando le prime due tipologie di soluzioni, in questa sede è stata posta maggiore attenzione su alcuni aspetti legati all'ottimizzazione delle infrastrutture presenti sul territorio. Nei paragrafi seguenti vengono descritti i Sistemi di Trasporto Intelligenti (ITS),

ossia lo strumento messo a punto nel corso del tempo dalla comunità scientifica e dagli esperti del settore per affrontare “in modo nuovo” i problemi relativi la mobilità di merci e persone, i loro riferimenti normativi sia europei che nazionali ed, in ultimo, le azioni generali da attivare ed i principali settori di intervento per favorire lo sviluppo di tali sistemi a livello nazionale.

## **1.2 I Sistemi di Trasporto Intelligenti (ITS)**

Gli Intelligent Transport (o Transportation) Systems (ITS) nascono negli anni 80 del secolo scorso dall'applicazione delle tecnologie informatiche e delle telecomunicazioni ai sistemi di trasporto ed oggi sono diventati uno strumento innovativo ed efficace per intervenire sulla mobilità, in grado di garantire significativi benefici su un orizzonte temporale di breve e medio termine. Possono essere sinteticamente definiti come l'insieme di procedure, sistemi e dispositivi che consentono, attraverso la raccolta, l'elaborazione e la distribuzione di informazioni, di migliorare la mobilità, di ottimizzare tutte le modalità di trasporto di persone e merci, nonché di verificare e quantificare i risultati raggiunti (Russo e Quattrone, 2010). Negli ultimi anni il rapido sviluppo della telematica e dell'informatica ha permesso agli ITS di diventare uno strumento in grado di accrescere l'accessibilità del territorio, intesa come conoscenza dei luoghi, dei punti di interesse e di offerta di mobilità relativa all'area stessa. Attraverso tale approccio, a fronte di oneri economici inferiori rispetto a quelli derivanti dall'adeguamento e costruzione di nuove opere, si è in grado di modellare la domanda di traffico sulle capacità disponibili, sfruttando al meglio le potenzialità dell'intera rete, di ottimizzare ed incrementare produttività, efficienza e sicurezza dei trasporti, sia di persone che di merci (Valenti e Mitrovich, 2009).

L'efficienza che gli ITS possono raggiungere dipende dell'integrazione tra le diverse fonti informative necessarie alla creazione di un quadro conoscitivo di base integrati con altri strati informativi “dinamici” generati dai dati acquisiti dalle piattaforme tecnologiche e da reti di sensori in grado di trasmettere le informazioni acquisite in tempo reale. Inoltre, anche una corretta pianificazione territoriale-urbanistica o la realizzazione di misure di incentivo o disincentivo, possono generare notevoli vantaggi in termini di organizzazione

del trasporto pubblico, in termini di orari e servizi, favorendo un uso più razionale delle infrastrutture stesse. Di contro, nonostante il sostegno della comunità europea finalizzato allo sviluppo di nuovi sistemi ITS, permangono barriere, quali la rapida obsolescenza delle tecnologie e le difficoltà di integrazione di tecnologie molto spesso eterogenee, che ne ostacolano una rapida e capillare diffusione. Ulteriori fattori che possono causare delle problematiche sono le difficoltà di cooperazione tra organizzazioni tradizionalmente non abituate a collaborare, la carenza di normative chiare e facilmente applicabili e la mancanza di consapevolezza da parte di amministratori pubblici, operatori e utenti circa i vantaggi delle tecnologie ITS. I principali campi di applicazione degli ITS sono (Glocus, 2013):

- i Sistemi Avanzati di Informazione agli Utenti (ATIS), in cui possono essere utilizzati per fornire varie tipologie di informazioni (meteo, traffico, incidenti, ecc.), per effettuare delle previsioni dei tempi di viaggio in funzione dei vari percorsi possibili, ecc.;
- i Sistemi Avanzati di Gestione della Domanda (ADMS), dove possono trovare applicazione nelle problematiche relative al car pooling, al car sharing, al controllo degli accessi o nella gestione dei sistemi di pagamento integrato;
- i Sistemi Avanzati di Gestione del Trasporto Pubblico (APTS), in cui possono essere utilizzati per la gestione delle flotte veicolari, per il pagamento elettronico e per il monitoraggio e controllo dell'esercizio;
- i Sistemi Avanzati di Controllo del Traffico (ATMS), dove possono essere adoperati per realizzare il controllo degli accessi alle rampe, il controllo dinamico della velocità o l'individuazione e gestione di incidenti;
- i Sistemi di Assistenza alla Guida (ADAS), nei quali trovano applicazione nei sistemi di adattamento intelligente della velocità, nei sistemi di assistenza per il mantenimento della distanza di sicurezza, nel monitoraggio delle condizioni del conducente e nei sistemi di assistenza per la guida ecologica (Eco-Driving) ed in quelli anticollisione.

### **1.3 Il quadro normativo europeo di riferimento**

Il sostegno finanziario dato dalla Commissione Europea, dal 2000 al 2006 e dal 2007 al 2013, ai progetti di ricerca e sviluppo ha contribuito in maniera decisiva allo sviluppo dei Sistemi ITS nei Paesi dell'Unione e alla creazione di un know-how europeo in questo settore. I cardini per la definizione di una politica europea sugli ITS sono il Libro Bianco del 2001 "La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte", la revisione di medio-termine del Libro Bianco "Mantenere l'Europa in movimento – mobilità sostenibile per il nostro continente", e il Libro Bianco "Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti – Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile" del 2011, nonché il Piano di Azione per la diffusione degli ITS in Europa del dicembre 2008 e la Direttiva 2010/40/UE del 7 luglio 2010.

Per completezza occorre citare, come documenti strategici per quanto concerne lo sviluppo degli ITS in Europa, anche il Libro Verde "Verso una nuova cultura per la mobilità urbana" del 2007, il Piano di Azione per la Logistica del trasporto merci del 2007, la Comunicazione su "ICTSs for Energy Efficiency" del 2008, il Piano d'Azione sulla Mobilità Urbana del 2009, il Piano d'Azione per le Applicazioni Satellitari GNSS del 2010, nonché, in particolare per quanto concerne il trasporto pesante, il Regolamento (UE) N. 1266/2009 della Commissione del 16 dicembre 2009 che adegua per la decima volta al progresso tecnico il regolamento (CEE) n. 3821/85 del Consiglio relativo all'apparecchio di controllo nel settore dei trasporti su strada.

A seguire viene riportata una breve descrizione delle principali norme europee in materia di ITS.

#### **1.3.1 Il libro Bianco sui Trasporti**

Nel Libro Bianco "La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte", e nel successivo Mid Term Review "Mantenere l'Europa in movimento – mobilità sostenibile per il nostro continente" pubblicato nel 2006, la Commissione Europea ha posto come obiettivo primario per la politica dei trasporti europea al 2010 quello di garantire ad ogni cittadino ed alle merci la possibilità di viaggiare in modo sicuro, efficiente e compatibile con l'ambiente, utilizzando tutti i modi di trasporto disponibili. Un obiettivo

che, secondo la Commissione, poteva essere realizzato attraverso alcune linee di azioni prioritarie, tra cui:

- lo sfruttamento ottimale delle potenzialità dei sistemi di trasporto e delle infrastrutture esistenti attraverso sistemi avanzati di gestione e controllo;
- la promozione del trasporto intermodale di merci e passeggeri;
- il rilancio delle ferrovie e dei trasporti marittimi e fluviali;
- l'adozione di nuove tecnologie al servizio della sicurezza stradale sia sul veicolo che nelle infrastrutture;
- lo sviluppo e la diffusione di sistemi di bigliettazione elettronica;
- la riduzione dell'inquinamento anche mediante l'impiego di tecnologie innovative di gestione della mobilità.

Anche nella nuova edizione del Libro Bianco “Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei Trasporti – per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile” del 2011, la Commissione Europea ha ribadito che l'innovazione tecnologica potrà consentire una transizione più rapida e meno costosa verso un sistema europeo dei trasporti più efficiente e sostenibile. In particolare, il Libro Bianco evidenzia il ruolo essenziale degli ITS per il miglioramento dell'efficienza e dell'impatto ambientale della rete di trasporto europea nel medio lungo periodo, grazie all'uso di migliori sistemi di informazione e di gestione del traffico, in ottica multimodale sia per il trasporto dei passeggeri che delle merci.

### **1.3.2 Il Piano di Azione per la diffusione degli ITS in Europa**

Allo scopo di promuovere ulteriormente lo sviluppo di ITS, la Commissione Europea, con la Comunicazione 886 del 16 dicembre 2008, ha pubblicato il Piano di Azione per la diffusione di Sistemi di Trasporto Intelligenti in Europa (ITS Action Plan). Obiettivo dell'ITS Action Plan è quello di creare le condizioni di tipo normativo, organizzativo, tecnologico e finanziario atte a favorire il passaggio da una fase di applicazione limitata e frammentata ad una diffusione coordinata su vasta scala degli ITS su tutto il territorio europeo al fine di apportare miglioramenti significativi ai cittadini europei sia in termini di sicurezza e qualità della vita ma, anche, in termini economici e occupazionali nei settori specifici della produzione industriale e della ricerca applicata. Con l'ITS Action Plan la Commissione ha quindi posto le basi per “accelerare e coordinare la realizzazione di ITS nel trasporto stradale, comprendendo le interfacce con gli altri modi di trasporto”, in una

visione totalmente multimodale del sistema dei trasporti europeo, al fine di rendere l'Europa capace di affrontare le grandi sfide della mobilità globale.

L'ITS Action Plan mette a sistema una serie di iniziative precedentemente lanciate dalla Commissione Europea, quali il pacchetto di misure per rendere i trasporti più ecocompatibili del 2008, l'iniziativa *i2010* per le automobili intelligenti del 2007, l'Azione *eSafety*, l'iniziativa *eFreight*, il Settimo Programma Quadro per la ricerca e lo sviluppo tecnologico, il programma *eCall*, le piattaforme tecnologiche europee e le loro agende di ricerca strategica, l'iniziativa *CARS 21* del 2005, nonché il programma *EasyWay* che riguarda l'implementazione delle tecnologie ITS sulla rete TERN (Trans-European Road Network). L'ITS Action Plan individua sei aree prioritarie di intervento, identificando per ciascuna di esse delle azioni specifiche, accompagnate da un preciso scadenziario. Le aree prioritarie sono:

- I. uso ottimale della strada, del traffico e dei dati relativi alla circolazione;
- II. continuità dei servizi ITS per la gestione del traffico e delle merci nei corridoi di trasporto europei e nelle conurbazioni;
- III. sicurezza stradale e protezione dei sistemi di trasporto;
- IV. integrazione dei veicoli nelle infrastrutture di trasporto;
- V. sicurezza e protezione dei dati e questioni legate alla responsabilità;
- VI. cooperazione e coordinamento europeo sugli ITS.

### **1.3.3 La Direttiva 2010/40/EU**

Il 7 luglio 2010 il Parlamento Europeo ed il Consiglio dell'Unione Europea, procedendo nel cammino di sostegno nella diffusione di sistemi intelligenti applicati al trasporto di persone e merci, hanno approvato la Direttiva 2010/40/UE sul quadro generale per la diffusione dei sistemi intelligenti nel settore del trasporto stradale e nelle interfacce con altri modi di trasporto. Tale Direttiva è, quindi, di fatto l'atto legislativo che concretizza le azioni previste dall'ITS Action Plan inserendole nelle agende politiche degli stati membri individuando quattro settori prioritari per gli ITS:

- I. uso ottimale dei dati relativi alle strade, al traffico e alla mobilità;
- II. continuità dei servizi ITS di gestione del traffico e del trasporto merci;
- III. applicazioni ITS per la sicurezza stradale e del trasporto;
- IV. collegamento tra veicoli e infrastruttura di trasporto.



Nell'ambito di questi quattro settori vengono individuate alcune azioni prioritarie:

- A. la predisposizione in tutto il territorio dell'Unione Europea di servizi di informazione sulla mobilità multimodale;
- B. la predisposizione in tutto il territorio dell'Unione Europea di servizi di informazione sul traffico in tempo reale;
- C. la condivisione di dati e procedure per la comunicazione gratuita agli utenti, ove possibile, di informazioni minime universali sul traffico connesse alla sicurezza stradale;
- D. la predisposizione armonizzata in tutto il territorio dell'Unione Europea di un servizio elettronico di chiamata di emergenza (eCall) interoperabile;
- E. la predisposizione di servizi d'informazione per aree di parcheggio sicure per gli automezzi pesanti e i veicoli commerciali;
- F. la predisposizione di servizi di prenotazione per aree di parcheggio sicure per gli automezzi pesanti e i veicoli commerciali.

#### **1.4 La normativa nazionale**

L'Italia è uno dei Paesi Europei a più alta densità di traffico interno che si distribuisce in maniera non uniforme lungo tutta la sua rete di trasporti in cui si evidenzia, secondo quanto riportato nel Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti 2011-2012, un sistema dalla mobilità intensa ma ai limiti della saturazione perché la maggior parte degli spostamenti avviene su strada: poco più del 90% per quanto riguarda lo spostamento delle persone e quasi il 58% per quello delle merci. Le problematiche del traffico diventano particolarmente gravi nelle aree urbane e metropolitane in cui si concentra più del 60% della popolazione, si svolge oltre il 70% delle attività produttive e circola il 70% dei veicoli. Ulteriori criticità del sistema della mobilità sono rappresentati dal fenomeno del pendolarismo tra sede di lavoro (in città) e abitazione (interland) e dal verificarsi di eventi eccezionali (incidenti, avverse condizioni meteorologiche, ecc.).

A seguire vengono brevemente descritte le principali norme nazionali in tema di ITS; dopo aver descritto brevemente il Piano Generale dei Trasporti e della Logistica (PGTL) e le

Linee Guida del Piano Generale della Mobilità (PGM), si sono riportati alcuni cenni relativi al Decreto Legge 179/2012 ed al Piano di Azione Nazionale sugli ITS.

#### **1.4.1 Il Piano Generale dei Trasporti e della Logistica (PGTL)**

Il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti con il D.P.R. del 14 Marzo del 2001 ha emanato il Piano Generale dei Trasporti e della Logistica (PGTL) in cui l'innovazione tecnologica riveste un ruolo chiaro poiché vengono introdotti i temi di modernizzazione e miglioramento del sistema dei trasporti in termini di economicità, ambiente e sicurezza. Il ricorso agli ITS è considerato una delle misure chiave per l'attuazione degli obiettivi di mobilità sostenibile perché, permettendo di realizzare una "visione integrata" dell'intera rete dei trasporti, sono considerati come uno strumento determinante per l'integrazione dei sistemi e dei servizi di mobilità.

Nel PGTL si possono riscontrare tutti gli obiettivi già enunciati nel Libro Bianco e Review del 2006 definiti dall'Unione Europea, individuando alcune azioni perseguibili, quali ad esempio:

- il miglioramento della utilizzazione delle infrastrutture, dei servizi e dei mezzi, la diffusione dei veicoli a basso impatto e l'uso dei mezzi alternativi, lo sviluppo della mobilità alternativa e condivisa;
- la diminuzione dell'inquinamento atmosferico ed il miglioramento della qualità e della vivibilità dell'ambiente urbano;
- lo sviluppo e la diffusione di tecnologie innovative volte al miglioramento dell'efficienza del parco circolante, nel rispetto delle compatibilità ambientali e dell'aumento della sicurezza e della competitività.

#### **1.4.2 Le Linee Guida del Piano Generale della Mobilità (PGM)**

Nel 2007 il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ha poi pubblicato le Linee Guida del Piano della Mobilità, nelle quali sono stati ribaditi gli obiettivi del PGTL di efficientamento e sicurezza dei trasporti. Le Linee Guida sono state oggetto di revisione nel 2010 per conferire maggiore enfasi agli obiettivi di co-modalità, innovazione, sicurezza stradale, sostenibilità ambientale, logistica, autostrade del mare e sviluppo delle reti trans

europee. Anche le Linee Guida attribuiscono un ruolo essenziale agli ITS per raggiungere gli obiettivi di efficienza, sicurezza e sostenibilità trasportistica, che sono alla base dello sviluppo del sistema della mobilità nazionale, in quanto gli ITS rappresentano lo strumento chiave per realizzare l'integrazione tra i modi e le reti di trasporto sia all'interno del Paese che con i grandi assi internazionali, in particolare dell'Europa e del vicino Mediterraneo. Gli ITS, infatti, fondati sull'interazione fra Informatica e Telecomunicazioni, consentono di trasformare i trasporti in un "sistema integrato", nel quale i flussi di traffico sono distribuiti in modo equilibrato tra le varie modalità, per una maggiore efficienza, produttività e, soprattutto, sicurezza del trasporto.

### **1.4.3 Il Decreto Legge 179/2012**

Il Decreto Legge del 18 Ottobre 2012 n. 179 "Ulteriori misure urgenti per la crescita del paese" definito anche Decreto Sviluppo Bis e convertito con modificazioni dalla legge 17 Dicembre 2012 n° 211, identifica gli ITS come settore rilevante per la crescita economica, per la modernizzazione dei sistemi di mobilità e come leva importante delle politiche di innovazione per la costruzione di un economia digitale. La norma sottolinea come basilare per lo sviluppo di soluzioni ITS innanzi tutto la necessità di promuovere l'adozione di "sistemi di bigliettazione elettronica interoperabile a livello nazionale" che possano progressivamente incidere in due differenti direzioni:

1. fungere da elemento di dissuasione verso l'evasione del pagamento delle tariffe di trasporto;
2. monitorare l'effettivo utilizzo del trasporto da parte dell'utenza per migliorare il servizio pubblico.

Sempre nello stesso Decreto si prevede la costituzione di una banca dati relativa alle infrastrutture e alle caratteristiche del servizio cui tutti gli enti proprietari o gestori di infrastrutture, di aree di sosta e di servizio e di nodi intermodali devono far convergere i dati. Questa priorità rientra nell'ambito fondamentale degli Open Data i quali hanno un ruolo fondamentale in un sistema di trasporto perfettamente intermodale e interoperabile.

Viene poi prevista la definizione dei requisiti per la diffusione, progettazione, realizzazione degli ITS per assicurare disponibilità di informazioni gratuite di base e l'aggiornamento delle informazioni infrastrutturali e dei dati di traffico, nonché le azioni per favorirne lo

sviluppo sul territorio nazionale in modo coordinato, integrato e coerente con le politiche e le attività in essere a livello nazionale e comunitario.

#### **1.4.4 Il Piano di Azione Nazionale sugli ITS**

Con il decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti n. 44 del 12 febbraio 2014 è stato adottato il “Piano nazionale per lo sviluppo dei sistemi ITS” in attuazione della Direttiva 2010/40/UE del Parlamento Europeo, del decreto-legge n. 179 del 18 ottobre 2012 e del decreto interministeriale n. 39 del 1 febbraio 2013.

Il Piano, che è nato per guidare lo sviluppo di tecnologie ITS in una prospettiva di crescita fino al 2020, è finalizzato ad identificare gli interventi di maggiore efficacia ai fini di ottimizzare le risorse complessive e raggiungere risultati coerenti con gli obiettivi della politica dei trasporti nazionale ed europea; ciò tenendo in adeguata considerazione le esperienze positive e le best practice già realizzate che possano fare da base alla diffusione di sistemi e servizi ITS a livello nazionale (del tutto interoperabili fra loro e con le analoghe applicazioni a livello europeo), così da raggiungere gli obiettivi della Direttiva 2010/40/UE.

Il Piano Nazionale evidenzia le seguenti azioni generali da attivare preventivamente per favorire lo sviluppo futuro di ITS:

- 1) procedere alla rivisitazione e all’aggiornamento dell’Architettura ITS nazionale per renderla più fruibile da parte degli utenti, nonché promuovere l’avvio di una adeguata attività di formazione sul territorio nell’ottica di favorire la creazione di adeguate figure professionali incaricate della progettazione, della gestione e della manutenzione degli ITS;
- 2) promuovere l’elaborazione e l’utilizzo di modelli di riferimento e di standard tecnici per la progettazione di soluzioni ITS allo scopo di adottare le specifiche tecniche in corso di definizione da parte della Commissione Europea e conseguire così l’interoperabilità e l’integrazione delle esperienze nazionali con gli analoghi sistemi in ambito comunitario;
- 3) promuovere una maggiore e più capillare diffusione di soluzioni ITS sulla rete stradale nazionale, soprattutto su quella non gestita dai concessionari autostradali, al fine di aumentare il livello di servizio delle infrastrutture garantendo maggiore sicurezza e minore vulnerabilità in caso di eventi eccezionali legati al traffico e/o a condizioni

atmosferiche avverse. Ad esempio, attraverso la diffusione in tempo reale di informazioni sullo stato del traffico e delle condizioni atmosferiche è possibile consentire la comunicazione tempestiva di percorsi alternativi o l'utilizzo di modalità di trasporto differenti al fine di abbattere i costi sociali causati dai blocchi della circolazione.

- 4) introdurre, in parallelo alla classificazione delle strade attualmente vigente, anche una classificazione relativa ai livelli di servizio offerti dalla strada stessa in base alle tecnologie ed ai servizi ITS di informazione, gestione e sicurezza presenti (quali, ad esempio: sensori, telecamere, pannelli a messaggio variabile, informazioni in tempo reale sul traffico e sulle condizioni atmosferiche, sistemi di gestione delle emergenze e di sicurezza delle strade, pagamento automatico del pedaggio, tracciamento delle merci pericolose);
- 5) attivare un meccanismo di misura e monitoraggio dei benefici ottenuti dalle diverse applicazioni ITS in esercizio e di quelle che saranno implementate, attraverso la costituzione di un database dei benefici ITS, al fine di quantificarne l'impatto su efficienza, sicurezza, emissioni ambientali e conseguente riduzione dei costi esterni;
- 6) favorire la messa in rete delle diverse piattaforme afferenti al trasporto merci, con particolare riguardo alle interfacce fra i diversi sistemi di trasporto, in modo da evitare eventuali sovrapposizioni e conflittualità;
- 7) creare le condizioni per l'utilizzo sistematico dei servizi forniti dai sistemi di navigazione satellitare europei in tutti i domini applicativi che si basano sull'informazione di posizione ed, in particolare, quelli raccomandati dalla Commissione Europea nel Piano d'azione relativo alle applicazioni del sistema globale di radionavigazione via satellite (GNSS);
- 8) favorire il migliore utilizzo delle tecnologie di bordo dei veicoli per il trasporto privato e collettivo in modo da agevolare la comunicazione V2V (veicoloveicolo) e V2I (veicolo-infrastruttura), nonché promuovere la diffusione e l'utilizzo di sistemi elettronici per il pagamento del pedaggio autostradale (anche predisponendo gli strumenti normativi atti a prevenire le frodi).

Sulla base delle azioni preventive fin qui elencate, il Piano di Azione Nazionale evidenzia quattro grandi macro-aree che costituiscono settori prioritari di intervento. In ognuno di questi settori, a loro volta, sono state evidenziate le azioni prioritarie volte alla diffusione di tecnologie ITS. I quattro settori prioritari di intervento sono:

1. uso ottimale dei dati relativi alle strade, al traffico e alla mobilità. Questo settore prioritario riguarda la disponibilità, accessibilità ed accuratezza di servizi di informazione sulla mobilità multimodale in tempo reale; tali informazioni devono però essere convalidate e rese disponibili a tutti i fornitori di servizi a condizioni eque, al fine di sostenere una gestione sicura e ordinata del traffico. Particolare importanza rivestono le "informazioni universali sul traffico" connesse alla sicurezza stradale, che devono essere fornite gratuitamente a tutti gli utenti. Le azioni prioritarie relative a questo settore sono:
  - predisposizione di banche dati relative alle informazioni sul traffico e la mobilità;
  - realizzazione di servizi di informazione sulla mobilità affidabili e certificati.
2. Continuità dei servizi ITS di gestione del traffico e del trasporto merci. In questo caso sono al centro dell'attenzione i temi relativi al conseguimento delle condizioni di sicurezza, di efficienza, di continuità ed interoperabilità dei servizi ITS per la gestione del traffico e del trasporto, nonché quelli necessari per stimolare intensivamente intermodalità e co-modalità nei corridoi di trasporto europei e nelle conurbazioni. Assicurare la continuità dei servizi ITS significa utilizzare al meglio le capacità esistenti e migliorare la gestione del trasporto merci sia in ambito urbano sia extraurbano, a beneficio della sostenibilità ambientale e della efficienza energetica. Le azioni prioritarie relative a questo settore sono:
  - sviluppare piattaforme aperte e interoperabili per la mobilità multimodale delle persone e delle merci;
  - sviluppare servizi ITS integrati per il trasporto multimodale delle persone e delle merci;
  - favorire l'uso degli ITS per la gestione del trasporto pubblico locale;
  - promuovere l'adozione di sistemi di bigliettazione elettronica interoperabile;
  - garantire la continuità dei servizi sulla rete nazionale e lungo i confini;
  - favorire le politiche di Smart Mobility nelle aree urbane e metropolitane.
3. Applicazioni ITS per la sicurezza stradale e per la sicurezza del trasporto. Questo settore riguarda le applicazioni ITS di safety e security dei trasporti, con particolare attenzione al servizio eCall, al tracciamento dei veicoli ai fini assicurativi (scatole nere), peraltro già presenti nell'agenda delle priorità nazionali, nonché allo sviluppo e alla diffusione di soluzioni centrate sul veicolo e finalizzate alla sicurezza preventiva. Le azioni prioritarie relative a questo settore sono:

- sviluppare il sistema di eCall nazionale;
  - realizzare aree di parcheggio sicure per i veicoli commerciali ed i mezzi pesanti;
  - implementare servizi ITS per le compagnie assicurative – black box;
  - sviluppare servizi di security nel Trasporto pubblico locale e nei nodi di trasporto;
  - favorire la diffusione dei sistemi di enforcement;
  - favorire la diffusione di ITS per il controllo dell'autotrasporto;
  - favorire la diffusione di sistemi ITS per la gestione ed il monitoraggio delle merci pericolose;
  - promuovere l'implementazione dei sistemi di bordo avanzati.
4. Collegamento tra i veicoli e l'infrastruttura di trasporto, non solo come un ambito operativo a se stante ma anche come settore abilitante per gli altri settori prioritari. Le comunicazioni Vehicle-to-Vehicle, Vehicle-to-Infrastructure e Infrastructure-to-Infrastructure rappresentano le tecnologie abilitanti per lo sviluppo di applicazioni innovative per la mobilità sostenibile. Le azioni prioritarie relative a questo settore sono:
- favorire la diffusione di sistemi V2I e V2V per la guida cooperativa;
  - monitorare lo stato dell'infrastruttura stradale in condizioni atmosferiche avverse, al fine di una migliore pianificazione degli interventi di manutenzione.

#### **1.4.5 Il Nuovo Codice della Strada**

La gestione del traffico e le problematiche ad esse connesse sono presenti anche nel Nuovo Codice della Strada, in cui si prevede in maniera esplicita la creazione di un sistema di monitoraggio del traffico stradale, nell'ambito di un'attività più generale finalizzata all'istituzione di archivi ed anagrafe nazionali, nell'intento di favorire l'innalzamento dei livelli di sicurezza sull'intera rete nazionale. In particolare all'art. 227 (Titolo VII - Disposizioni finali e transitorie, Capo I) sono dettate, tra l'altro, le seguenti indicazioni:

“1. Nell'ambito dell'intero sistema viario devono essere installati dispositivi di monitoraggio per il rilevamento della circolazione, i cui dati sono destinati alla costituzione e all'aggiornamento dell'archivio nazionale delle strade e per la individuazione dei punti di maggiore congestione del traffico;

2. Gli enti proprietari delle strade sono tenuti ad installare i dispositivi di cui al comma precedente e contestualmente, ove ritenuto necessario, quelli per il rilevamento dell'inquinamento acustico e atmosferico, in conformità, per tali ultimi, alle direttive impartite dal Ministero dell'ambiente, sentito il Ministero dei lavori pubblici.”

## **1.5 Riferimenti bibliografici**

Commissione della Comunità Europea (2001). *LIBRO BIANCO - La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte.*

Commissione della Comunità Europea (2006). *Mantenere l'Europa in movimento - una mobilità sostenibile per il nostro continente Riesame intermedio del Libro bianco sui trasporti pubblicato nel 2001 dalla Commissione europea.*

Commissione Europea (2008). *Piano di Azione per la diffusione di Sistemi di Trasporto Intelligenti in Europa.*

Commissione Europea (2011). *LIBRO BIANCO Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti - Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile.*

Decreto Legge del 18 Ottobre 2012, n. 179. *Ulteriori misure urgenti per la crescita del paese.*

Direttiva 2010/40/EU del Parlamento Europeo e del Consiglio (2010). *Sul quadro generale per la diffusione dei sistemi di trasporto intelligenti nel settore del trasporto stradale e nelle interfacce con altri modi di trasporto.*

D.P.R. del 14 Marzo del 2001. *Piano Generale dei Trasporti e della Logistica (PGTL).*

Glocus (2013). *TRASPORTI 2.0: L'innovazione per migliorare l'efficienza e la qualità del trasporto delle merci e delle persone.* [http://www.glocus.it/wp-content/uploads/2013/10/Trasporti2.0\\_paper\\_def.pdf](http://www.glocus.it/wp-content/uploads/2013/10/Trasporti2.0_paper_def.pdf)

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2007). *Linee Guida del Piano Generale della Mobilità (PGM).*



- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2014). *Piano nazionale per lo sviluppo dei sistemi ITS*.
- Russo F. e Quattrone A. (2010). *ITS. Sistemi di trasporto intelligenti. Elementi di base e applicazioni operative per il trasporto privato, per il trasporto pubblico, per il trasporto merci e la logistica*. Strumenti per l'analisi dei sistemi di trasporto - Università Mediterranea di Reggio Calabria (ISBN: 9788856830217).
- UNECE, United Nations Economic Commission for Europe, (2012). *Intelligent Transport Systems (ITS) for sustainable mobility*. [http://www.unece.org/trans/theme\\_its](http://www.unece.org/trans/theme_its)
- Valenti G. e Mitrovich S. (2009). *Tecnologie ITS per i Sistemi di Trasporto*. Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) [http://old.enea.it/produzione\\_scientifica/pdf\\_brief/Valenti\\_ITStrasporti.pdf](http://old.enea.it/produzione_scientifica/pdf_brief/Valenti_ITStrasporti.pdf)

## **CAPITOLO 2**

### **La gestione del traffico: modelli e monitoraggio**

#### **2.1 Introduzione**

Come descritto nel capitolo precedente, la gestione del traffico e le problematiche ad esse connesse hanno suscitato notevole interesse negli ultimi decenni sia a livello comunitario che a livello nazionale.

Nella prima parte del presente capitolo vengono descritti i modelli matematici che sono stati messi a punto nel corso del tempo in grado di effettuare analisi precise ed accurate del traffico e della sua evoluzione nel tempo; nello specifico, vengono brevemente trattati i principali modelli matematici di tipo microscopico, di tipo macroscopico e di tipo mesoscopico. Successivamente, nella seconda parte del capitolo, vengono trattati gli aspetti legati alla progettazione di un sistema di monitoraggio dei flussi di traffico descrivendo in maniera sintetica i possibili oggetti del monitoraggio e le relative finalità, la modalità operativa con le quali definire gli ambiti del monitoraggio ed il calendario di raccolta dati ed, alla fine, la fase relativa la gestione ed interpretazione delle informazioni acquisite.

## 2.2 I modelli di simulazione del traffico

Negli ultimi decenni sono messi a punto svariati modelli matematici in grado di supportare i tecnici nel delicato compito di effettuare analisi accurate sull'evoluzione dei flussi di traffico (Ricci, 2011; Salvo, 2012). Tali modelli, il cui sviluppo è anche da imputare al repentino ed inarrestabile sviluppo tecnologico dei “calcolatori elettronici”, consentono di effettuare analisi sia di tipo simulative che previsionali.

La prima tipologia, quella simulativa, analizza come si comporta il modello quando è sollecitato da particolari condizioni esterne, senza che queste debbano per forza verificarsi nella realtà. Questo aspetto è di particolare interesse per un gestore di una tratta stradale che ha la necessità di sapere cosa accadrebbe se, per un qualsiasi motivo che esula dalla quotidianità, la tratta in questione fosse temporaneamente sottoposta a condizioni ben diverse da quelle di regime (per esempio un drastico aumento dei veicoli dovuto ad una eventualità particolare o una diminuzione del numero di corsie percorribili).

La seconda, ossia quella di tipo previsionale, è realizzabile attraverso un controllo delle condizioni del traffico e, pertanto, attraverso essa è possibile anche effettuare delle previsioni circa l'accadimento di fenomeni critici quali ingorghi o rallentamenti, eventualmente prevenirli, oppure, qualora non sia comunque possibile restare in una condizione di deflusso accettabile, attrezzarsi per affrontare nella maniera migliore la criticità. In tale contesto, i modelli di traffico svolgono un ruolo attivo nell'individuazione degli stati di traffico e delle criticità del sistema, consentono di stabilire quali particolari misure adottare per tenere in debito conto situazioni eccezionali (un incidente o la chiusura temporanea di una corsia) ed infine valutare gli effetti delle contromisure adottabili.

In linea generale, i modelli di simulazione del traffico sono suddivisibili in:

- modelli microscopici, che descrivono il comportamento del traffico con un alto livello di dettaglio e che considerano il singolo veicolo descrivendo i movimenti di quest'ultimi come il risultato di scelte individuali e delle interazioni con gli altri veicoli e con l'ambiente stradale; inoltre, permettono di determinare la posizione, la velocità e l'accelerazione dei singoli veicoli.
- modelli macroscopici, che utilizzano relazioni di insieme e individuano proprietà e variabili di stato globali in cui il traffico generalmente è descritto come un flusso definito da regole comportamentali che si basano principalmente sull'interazione dei veicoli tra di loro e con l'infrastruttura. Sono detti anche modelli continui nel tempo e nello spazio in quanto si basano sulla simulazione continua del traffico e la

teoria matematica che vi sta dietro viene impostata sulle dinamiche temporali e unidimensionali, rispettando le leggi di conservazione del flusso.

- modelli mesoscopici, che si pongono a un livello di dettaglio intermedio tra i precedenti, esaminano il comportamento di gruppi di veicoli, permettendo quindi una semplificazione dello studio rispetto alla micro ma un livello di dettaglio maggiore rispetto alla macrosimulazione. Infatti, il modello mesoscopico non considera il singolo veicolo (come nel caso microscopico), bensì insiemi di veicoli, raggruppabili per caratteristiche comuni, ad esempio la stessa coppia origine/destinazione.

### **2.2.1 I modelli microscopici**

I modelli di simulazione di tipo microscopico sono in grado di rappresentare in maniera puntuale il traffico e la sua evoluzione istantanea, prendendo in considerazione gli aspetti geometrici di dettaglio dell'infrastruttura e il comportamento del conducente e sono in grado di analizzare ed elaborare istante per istante il movimento di ogni singolo veicolo presente sulla rete stradale. Attraverso il loro utilizzo è possibile rappresentare più famiglie di spostamenti, ognuna caratterizzata da differenti parametri comportamentali (accelerazione, decelerazione, aggressività, tempo di reazione, ecc.) e da diverse tipologie di veicolo (velocità massima, dimensioni, prestazioni, parametri di emissione, ecc.).

In queste tipologie di modelli si considera che il guidatore aggiorna la propria velocità ed accelerazione in funzione della situazione del traffico che lo circonda; in particolare, la posizione del generico veicolo al tempo  $t+\Delta t$  viene stimata a partire dalla posizione e dalla velocità tenuta dal guidatore al tempo  $t$ .

Tra i modelli presenti in letteratura che sono in grado di rappresentare singolarmente il movimento di ciascun veicolo sulla base del comportamento del conducente si ricordano, ad esempio, quelli che si basano sulla:

- teoria dell'inseguitore - Car Following,
- teoria del cambio corsia - Lane Change,
- teoria dell'intervallo minimo di accesso - Gap Acceptance.

La prima tipologia di modelli (car following) è applicabile alle strade costituite da un'unica corsia e si basa sull'idea che ogni veicolo si muove lungo una strada seguendo il veicolo

che lo precede e perciò la sua dinamica è funzione solo di quel veicolo. Nei primi modelli sviluppati tra il 1950 ed il 1960 si assumeva che ogni guidatore tendesse a muoversi con la stessa velocità del veicolo che lo precedeva; in tal modo, la velocità e l'accelerazione del veicolo che segue risultano essere funzione sia della velocità del veicolo stesso ma anche della vettura che lo precede. Successivamente, nel modello sviluppato da Gipps nel 1981, furono introdotte due componenti separate di accelerazione e decelerazione: in tale modellazione era introdotta l'ipotesi che il conducente tende a raggiungere la velocità desiderata modellando la dinamica del veicolo in condizioni di flusso libero (componente di accelerazione) ma è costretto a modificare la propria velocità in funzione di quella del veicolo che lo precede (componente di decelerazione).

Negli anni seguenti quest'ultimo modello è stato modificato per quanto concerne la determinazione della velocità desiderata, la quale risulta essere funzione di tre parametri: la velocità massima desiderata, il limite massimo di velocità per il tratto di strada preso in esame ed il rispetto dei limiti di velocità da parte del guidatore (tale parametro può essere scelto attraverso una distribuzione di probabilità, che partendo da osservazioni reali riproduce il grado di aggressività dei guidatori). Ulteriori miglioramenti introdotti si basano sull'ipotesi che anche i veicoli della corsia adiacente possono influenzare la velocità del veicolo (distinzione se la corsia adiacente è di decelerazione o di altro tipo) e l'influenza della salita e della discesa sui parametri caratteristici dei veicoli, in particolare su la massima accelerazione e decelerazione del veicolo (anche funzione della pendenza percentuale della strada).

La seconda tipologia di modelli (lane changing models) descrive il comportamento di un conducente lungo arterie stradali più grandi in cui viene presa anche in considerazione la possibilità di effettuare dei cambi di corsia tenendo in considerazione la corsia attuale, ed i possibili veicoli in arrivo sulla corsia utilizzabile per il sorpasso, la loro distanza e velocità e il grado di propensione al rischio del guidatore. Il primo modello messo a punto da Gipps nel 1986 è applicabile in ambito urbano ed il processo decisionale del guidatore che deve effettuare un cambiamento di corsia risulta essere funzione dei segnali, delle ostruzioni e della presenza di veicoli pesanti (per es. bus, camion) presenti.

I fattori principali presi in considerazione nel processo decisionale sono la necessità, l'opportunità e la sicurezza ma, l'incongruenza e la non omogeneità nel comportamento di guida dei vari guidatori, non vengono modellate. Nello specifico la necessità o l'opportunità di modificare corsia è determinata per ogni guidatore confrontando un fattore

di rischio, calcolato in funzione della posizione relativa del veicolo rispetto all'oggetto che dà luogo alla necessità di un cambiamento di corsia, con un fattore di rischio accettabile che dipende dal tipo di cambiamento di corsia che deve essere effettuato e dalla sua urgenza.

In letteratura sono presenti anche dei modelli applicabili in ambito autostradale in cui si utilizzano delle funzioni probabilistiche per descrivere il comportamento del guidatore quando esso si trova davanti a più decisioni possibili da prendere. Il guidatore considera un possibile cambiamento di corsia solo quando la velocità del veicolo che lo precede è inferiore alla sua velocità desiderata e controlla sulla corsia a lui adiacente l'opportunità di aumentare la propria velocità. In particolare i cambiamenti di corsia possono essere di due tipologie: di tipo obbligati, in cui il guidatore deve per forza cambiare corsia come ad esempio il caso delle rampe di uscita, o di tipo discrezionali, in cui il guidatore capisce che le condizioni di guida nell'altra corsia sono migliori.

La terza tipologia di modelli è costituita dalle problematiche legate al gap acceptance che risulta essere un elemento importante nella maggior parte dei modelli lane change. Per eseguire manovre di cambio di corsia, il guidatore, infatti, valuta la posizione e la velocità dei veicoli che lo precedono e in arrivo nella corsia prescelta. I modelli di gap acceptance sono formulati come un problema di scelta binario, nel quale i guidatori decidono se accettare o rifiutare il possibile gap, confrontandolo con un gap critico (minimo gap accettabile).

I gap critici sono modellati come variabili random per analizzare la variazione dei comportamenti dei diversi o degli stessi guidatori.

Differenti modelli di gap acceptance sono stati sviluppati sull'ipotesi che il critical gap segua una specifica distribuzione di probabilità. Nel 2009 nel manuale americano Highway Capacity Manual veniva proposta la media del gap critico a un incrocio per stimare il ritardo e la capacità di quest'ultima. L'HCM definisce il gap critico per un'intersezione controllata da due stop come la media di tutti i gap accettabili. Una grave limitazione di tale definizione è che un'osservazione su un grande gap accettato da un conducente non fornisce informazioni circa il minimo gap accettabile. Nella revisione della procedura HCM, il gap critico è definito come il più grande gap rigettato. Questa definizione è ancora imperfetta, poichè un guidatore molto prudente può aumentare notevolmente la stima in quanto anche con gap elevati non effettua la manovra. Ulteriori studi hanno elencato altre

carenze di questo approccio e, per tenere conto dei fattori relativi al comportamento degli autisti, sono stati implementati anche dei modelli random.

### 2.2.2 Modelli macroscopici

I modelli macroscopici si basano su un'analogia con la fluidodinamica e sono nati nel 1955 come un'applicazione dei concetti car following ai modelli continui. Infatti da un punto di vista macroscopico, il traffico automobilistico può essere visto come un fiume che scorre; per questo motivo è abbastanza naturale associare il flusso di traffico allo scorrimento di un fluido e trattarlo di conseguenza. L'analogia con i fluidi ci porta a focalizzare l'attenzione su alcune grandezze fisiche quali il flusso, la concentrazione (in termini di densità spaziale) e la velocità; il traffico veicolare viene trattato come un fluido monodimensionale incompressibile considerando le seguenti ipotesi di partenza:

1. il flusso di traffico si conserva e come tale sarà regolato da una legge di conservazione così come i fluidi;
2. c'è una corrispondenza biunivoca tra velocità e densità e tra flusso e densità, che si concretizza in un'equazione di stato.

La differenza rispetto ai modelli microscopici risiede nel fatto che i modelli macroscopici studiano il traffico nella sua totalità, tralasciando la dinamica di ogni singolo veicolo. Il modello macroscopico sviluppato nel 1971 da Payne prende in considerazione le seguenti variabili di stato:

- $\rho(x, t)$ , densità del traffico definita come il numero dei veicoli presenti mediamente per unità di lunghezza. Viene misurata in [veh/km];
- $q(x, t)$ , flusso del traffico definito come il numero dei veicoli passanti da una specifica sezione della tratta stradale nell'unità di tempo. Viene misurata in [veh/h];
- $v(x, t)$ , velocità media dei veicoli misurata in [km/h];

le quali sono legate tra loro dalla seguente equazione di stato:

$$q(x, y) = \rho(x, t) \cdot v(x, t) \quad (1)$$

Inoltre, essendo il modello di traffico basato sui principi della fluidodinamica, una volta fissato un tratto di strada l'equazione di conservazione della materia in termini differenziali è definita come:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} q(x, t) = r(x, t) - s(x, t) \quad (2)$$

dove:

- $r(x, t)$ , indica il flusso dei traffico in entrata dalle rampe di entrata e viene misurato in [veh/km];
- $s(x, t)$ , indica il flusso dei traffico in uscita dalle rampe di uscita e viene misurato in [veh/km];

Per quanto riguarda, invece, la relazione che lega la velocità e la densità sono presenti in letteratura vari modelli; tra questi, il modello dinamico a tempo discreto proposto da Papageorgiou nel 1985 riesce a riprodurre fedelmente situazioni di traffico molto complesse descrivendo il comportamento medio di una rete stradale. In tale modellazione la rete stradale viene rappresentata come un grafo orientato dove i vari link descrivono tratti di strada aventi caratteristiche omogenee e i nodi collegano due o più link con caratteristiche geometriche diverse. Vengono usati cinque tipi di link:

- link stradali, che rappresentano le tratte di strada con caratteristiche identiche,
- link di origine, che ricevono un flusso o lo immettono nella rete,
- link di destinazione, che ricevono un flusso e lo espellono all'esterno,
- store and forward link, usati per modellare rampe di accesso o di uscita dalla strada principale,
- links fittizi, usati per modellare una rappresentazione complessa.

In particolare, la relazione tra velocità e densità di tale modello è espressa dalla formula seguente:

$$v = v_f \left[ \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{max}} \right)^l \right]^m \quad (3)$$

dove:

- $v_f$  è la velocità critica per la quale il flusso è massimo;
- $\rho_{max}$  è la densità massima

L'andamento di tale relazione è di tipo esponenziale decrescente ed è riportato nella figura seguente.



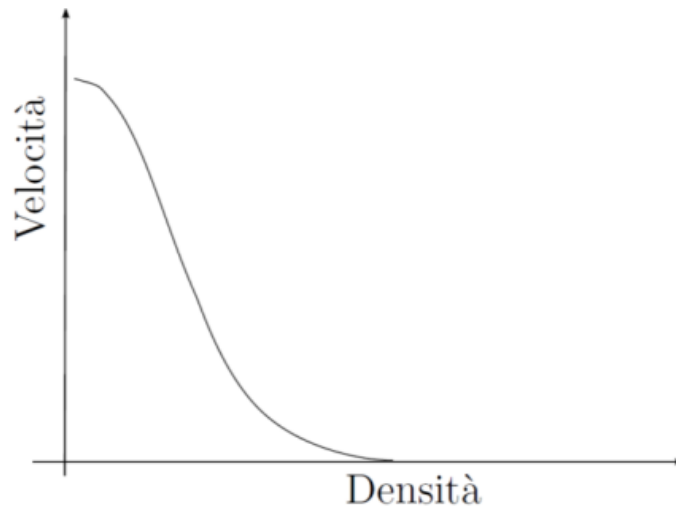


Figura 1 - Andamento della velocità al variare della densità

Infine, la relazione che lega il flusso alla densità è data dalla seguente formula e rappresenta il diagramma fondamentale del traffico molto utile per comprendere e prevedere l'evoluzione del traffico in base a fenomeni particolari.

$$q(x, t) = \rho(x, t) \cdot v(x, t) = \rho(x, t) \cdot v_f \cdot \left(1 - \frac{\rho(x, t)}{\rho_{max}}\right) \quad (4)$$

ovvero una parabola che passa per l'origine avente un massimo in  $\rho_{max}/2$  e con una seconda intersezione con l'asse delle  $\rho$  in  $\rho_{max}$ . Nel caso non ci fosse una relazione lineare tra la velocità e la densità come nel caso di Greenshields, il diagramma flusso-densità è dato da una parabola non simmetrica in cui il valore della densità critica non si trova più a metà rispetto alla densità massima, come si può vedere nella figura seguente.

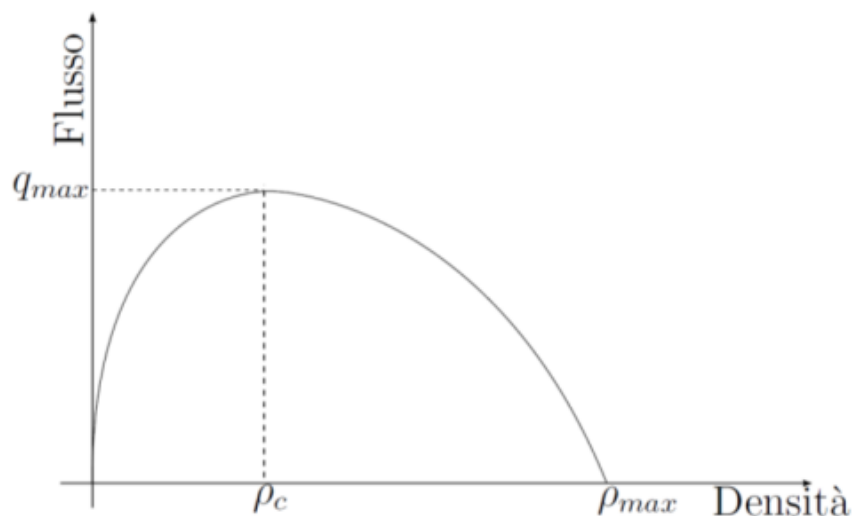


Figura 2 - Curva caratteristica Flusso-Densità nel caso generale

In generale, la parte con  $\rho < \rho_c$  del diagramma viene denominata parte stabile o a traffico leggero, mentre la parte con  $\rho > \rho_c$  viene denominata parte instabile o a traffico pesante. Per instabilità si intende che il flusso diventa sempre più congestionato e rallentato fino a raggiungere i valori prossimi a  $\rho_{max}$ . La zona intermedia, nella quale i valori di densità sono vicini a  $\rho_c$ , è una zona importante in quanto è caratterizzata dal fenomeno dello stop and go. L'abbandono delle condizioni di stazionarietà è dovuto a bruschi eventi esterni come l'alt del semaforo, i lavori in corso sulla rete stradale o gli incidenti; dal luogo della perturbazione partirà verso monte una cosiddetta onda d'urto, che investe la corrente veicolare a densità normale generando una coda. Contemporaneamente, partirà verso valle un'altra onda che riflette l'effetto dell'ostruzione diminuendo, perciò, la densità.

### **2.2.3 Modelli mesoscopici**

L'approccio mesoscopico vuole descrivere statisticamente il comportamento dei veicoli accorpando il flusso dei veicoli in insiemi che hanno caratteristiche simili, affinché vengano snellite le procedure di calcolo. In questi modelli non viene analizzato singolarmente il veicolo come nei modelli microscopici, ma si considera un gruppo di veicoli che agiscono come se fossero un unico elemento e la loro velocità lungo un percorso è ottenuta da una funzione velocità-densità definita per ciascun tratto stradale. In questo modo la velocità del veicolo non è determinata dal comportamento e dalle decisioni del guidatore; inoltre non vengono considerati cambiamenti di corsia, accelerazione e decelerazioni. Ci sono diversi tipi di modelli mesoscopici, in ognuno dei quali cambia la rappresentazione della strada e del veicolo; in alcuni modelli si utilizza un sistema a coda nel quale la strada è vista come un insieme di zone in coda e in movimento. In questo caso ogni veicolo è considerato singolarmente, ma non allo stesso livello di un modello microscopico. La zona di strada caratterizzata dal movimento viene descritta attraverso una relazione velocità-densità tipica del modello macroscopico, mentre la parte in coda è gestita da un sistema coda-server. Un altro tipo di approccio utilizza una visione cellulare della strada, nella quale essa viene divisa in celle unitarie che possono essere vuote o occupate da un veicolo. Per far avanzare il veicolo lungo le celle vengono utilizzate regole abbastanza semplici, che determinano ad ogni istante di tempo il numero di celle che ogni veicolo deve attraversare. In questi casi risulta anche abbastanza difficile stabilire se questi modelli devono essere aggregati a quelli microscopici o a quelli macroscopici.

Il vantaggio di questi modelli è che possono essere applicati nelle situazioni dove si vorrebbe il dettaglio di una simulazione microscopica, ma questa non è possibile a causa delle dimensioni della rete o per la mancanza di risorse necessarie per implementare un microsimulatore.

### **2.3 Progettazione di un sistema di monitoraggio del traffico**

I sistemi di monitoraggio del traffico sono costituiti dall'insieme di strumentazioni, tecniche per il rilevamento, trasmissione ed elaborazione dei dati raccolti che, in funzione dell'ambito territoriale da monitorare e degli obiettivi da perseguire, possano consentire una buona caratterizzazione del modello del traffico sul quale poter impostare analisi e, conseguentemente, derivare delle politiche di intervento per la gestione ottimale della rete stradale (Salvo, 2012; Messina et al., 2011). Gli elementi significativi che devono essere presi in considerazione durante la fase di progettazione di un sistema di monitoraggio del traffico sono:

- il numero e la tipologia di variabili da monitorare, in funzione dell'oggetto e delle finalità del monitoraggio;
- l'apparato strumentale (metodi e le tecnologie da adottare) ed organizzativo del sistema di acquisizione (architettura funzionale e modalità di trasmissione dei dati acquisiti);
- l'estensione spaziale dell'oggetto di osservazione (area circoscritta, vasta, urbana, extraurbana, ecc.) e della rete stradale (semplice intersezione, singolo ramo, gruppo di rami e intersezioni, rete principale, ecc.);
- l'estensione temporale del monitoraggio (periodo di riferimento, durata delle operazioni d'indagine, cadenza temporale delle misure).

### 2.3.1 Oggetto e finalità

Le principali variabili del deflusso veicolare che generalmente sono oggetto di monitoraggio sono la portata, la velocità e la densità: la portata “q” (nota anche come flusso) è il numero di veicoli che nell’unità di tempo attraversano una sezione dell’infrastruttura e si misura in veicoli/h, la velocità “v” è lo spazio percorso nel tempo unitario e si misura generalmente in km/h e la densità (o concentrazione) “k” è definita come il numero di veicoli che ad un tempo prefissato t sono contenuti in un tronco di infrastruttura di lunghezza unitaria e si misura generalmente in veic/km.

Altre variabili correlate al traffico che possono essere suscettibili di monitoraggio possono riguardare gli eventi che possono incidere sul traffico (incidenti, manovre di svolta, cambi corsia, ecc.), le caratteristiche dei veicoli (peso totale, lunghezza, altezza, classificazione per tipo, ecc.); le infrazioni (eccesso di velocità, inosservanza di arresto al rosso semaforico o allo stop, sosta vietata, marcia controsenso, difetto di illuminazione dei fari, ecc.) ma anche le condizioni meteorologiche ed i parametri ambientali (presenza di nebbia, ghiaccio, vento, pioggia, neve; concentrazioni di sostanze inquinanti, ecc.).

Le informazioni acquisite durante il monitoraggio dei flussi veicolari possono essere utilizzate durante per molteplici finalità, quali ed esempio la:

- Regolazione del traffico: In ambito urbano è possibile effettuare sia la regolazione adattiva di una singola intersezione semaforizzata, finalizzata ad ottimizzarne la capacità e minimizzare i ritardi dei veicoli, che la regolazione di reti di intersezioni semaforizzate, volte alla scelta del piano semaforico più adatto alle situazioni di traffico osservate. In questo ultimo caso, le attività di monitoraggio potrebbero essere finalizzate ad ottimizzare in tempo reale il funzionamento dei semafori di una rete al fine di minimizzare il tempo di viaggio dei veicoli sulla rete, il tempo di attesa agli incroci o l’estensione della congestione.
- Per quanto riguarda, invece, il deflusso autostradale, l’obiettivo è quello di mantenere un certo livello di servizio in rapporto agli eventi, quali incidenti o rallentamenti dovuti all’aumento del flusso di traffico, che possono alterare le condizioni di normale deflusso. Esso può essere raggiunto attraverso diverse azioni quali la regolazione di velocità, facendo uso di pannelli a messaggio variabile (PMV), o il dirottamento degli utenti verso altri itinerari in caso di forte congestione.
- Gestione delle vie e controllo della sosta in ambito urbano: In alcune arterie urbane per far fronte alla maggiore o minore domanda di mobilità è possibile variare a

secondo degli orari della giornata la capacità di un percorso stradale attribuendo, per esempio, una corsia una volta ad un senso di marcia e una volta all'altro. Inoltre, nelle aree destinate a parcheggio è altresì possibile effettuare degli interventi finalizzati volti all'ottimizzazione del livello di riempimento dei parcheggi.

- Informazione agli utenti della strada: Avvisando gli automobilisti attraverso messaggi via radio o tramite dei PMV è possibile informarli circa le condizioni del traffico nelle aree in cui si trovano a circolare o verso cui si stanno dirigendo ed eventualmente, ad esempio, suggerire loro il migliore itinerario da seguire per raggiungere la destinazione.
- Lotta contro le infrazioni: Numerose infrazioni del Codice della Strada, quali ad esempio il superamento della velocità limite o della linea continua, la violazione di stop e del rosso semaforico e l'insufficiente distanziamento dal veicolo precedente, possono essere rilevate in modo automatico al fine di facilitare la loro repressione e soprattutto dissuadere i guidatori recidivi dall'assumere comportamenti scorretti che possono tradursi in situazioni di pericolo.
- Sorveglianza di passaggi a livello e gallerie: E' possibile rilevare la presenza di veicoli bloccati o di altri ostacoli sui binari in prossimità di un passaggio a livello, con lo scopo di evitare la collisione con il treno, e all'interno di gallerie, in cui si deve ridurre al massimo il rischio di incendio.
- Realizzazione di studi e di ricerche: I dati acquisiti durante un monitoraggio possono essere finalizzati ad esempio alla calibrazione di modelli matematici di simulazione delle condizioni di deflusso e all'analisi del comportamento dello stile di guida dei automobilisti.

### **2.3.2 Ambiti del monitoraggio e calendario raccolta dati**

Una volta definiti gli obiettivi e le finalità che si vuole perseguire attraverso un qualsivoglia sistema di monitoraggio del traffico, occorre definire gli ambiti geografici e temporali del monitoraggio e, successivamente, definire il calendario di raccolta dei dati.

Nello specifico, l'ambito territoriale su cui effettuare il monitoraggio può essere più meno vasto; ad esempio, le indagini possono essere effettuate su:

- un'area circoscritta, per esempio una zona in cui è previsto un intervento puntuale di adeguamento del sistema di trasporto;
- un corridoio territoriale fra due siti definiti;
- un'area urbana più o meno ampia;
- un'area comprensoriale, sub-regionale o regionale.

Una volta individuato l'ambito territoriale occorre definire la tipologia delle infrastrutture di trasporto, ovvero le classi funzionali delle strade su cui effettuare il monitoraggio. Di norma si pianifica il monitoraggio di strade aventi caratteristiche operative e di traffico simili in modo tale da poter acquisire informazioni sul traffico su un campione di dati grande possibile che possa rappresentare, dal punto di vista statistico, le reali condizioni di traffico delle infrastrutture viarie investigate.

Successivamente, occorre definire l'ambito temporale in cui effettuare le attività di monitoraggio: qualora il monitoraggio non fosse realizzato in continuo è buona norma raccogliere i dati in condizioni di traffico "tipiche" o "medie" quali ad esempio i periodi primaverili (Marzo, Aprile e Maggio) o autunnali (Settembre, Ottobre e Novembre) in nei giorni intermedi della settimana (da martedì a giovedì) ed in determinati orari (periodi di punta o di morbida).

Nel caso in cui il monitoraggio fosse finalizzato ad esaminare particolari fenomeni di traffico allora potrebbe essere opportuno effettuare il monitoraggio sia su specifici periodi dell'anno che in determinati orari di fissati giorni della settimana.

Infine, si deve effettuare lo scheduling delle attività di rilevamento; ossia si deve comunicare al personale che realizzerà il monitoraggio dei dati del traffico, il calendario di raccolta dei dati in modo tale che le informazioni che verranno acquisite siano utili per il raggiungimento delle finalità del monitoraggio stesso. Per evitare problemi di vario tipo durante le operazioni di acquisizione dei dati può risultare conveniente addestrare appositamente il personale da impiegare.

### **2.3.3 Gestione ed interpretazione delle informazioni acquisite**

I dati relativi il traffico acquisiti durante le campagne di raccolta sono organizzati e gestiti attraverso dei data-base, di solito di tipo relazionale, i cui elementi principali sono rappresentati da:

- i riferimenti spaziali sul territorio (gli elementi monitorati del sistema stradale: sezione, tronco, corridoio, ecc.);
- i riferimenti temporali elementari (mesi, giorni, fasce orarie all'interno di un giorno);
- i riferimenti temporali aggregati, che costituiscono l'orizzonte temporale all'interno del quale viene eseguita l'attività di monitoraggio;
- l'insieme dei parametri di traffico oggetto del monitoraggio, che possono essere soggetti ad ulteriori elaborazioni.

Una volta realizzato il data-base relazionale sarà possibile estrapolare le singole tipologie di informazioni a secondo delle specifiche esigenze e divulgare tali dati in vari modi (portali web, radio, PMV, ecc.). La frequenza di aggiornamento dei dati del traffico dipende dalla tecnologia utilizzata per la realizzazione delle campagne di monitoraggio, ad esempio qualora i singoli elementi di acquisizione delle informazioni riescano a trasmettere in tempo reale i dati che registrano allora i risultati del monitoraggio potranno anche aggiornarsi in tempo reale, o al più con dei leggeri ritardi temporali.

## **2.4 Riferimenti bibliografici**

Highway Capacity Manual, HCM (2010), Transportation Resercher Board – National Research Council (ISBN: 0-309-06746-4).

Messina M.G., Valenti G., Carapellucci F., Fusco G., Colombaroni C., Gemma A., Ciccarelli G., Lo Sardo S. (2011). *Sistema di monitoraggio e previsione della mobilità veicolare per l'integrazione tra la rete della illuminazione pubblica e la rete della mobilità*. Report ENEA RdS/2011/330. [http://www.enea.it/it/Ricerca\\_svilup\\_po/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/smart-city/rds-330.pdf](http://www.enea.it/it/Ricerca_svilup_po/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/smart-city/rds-330.pdf)

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, (2010). *Linee guida per la progettazione dei sistemi di monitoraggio del traffico*. [http://www.perlasicurezzastradale.org/public/PDF/Linee\\_Guida\\_Progettazione\\_Sistemi\\_Monitoraggio\\_Traffico.pdf](http://www.perlasicurezzastradale.org/public/PDF/Linee_Guida_Progettazione_Sistemi_Monitoraggio_Traffico.pdf)

PRIN (2004) I sistemi stradali di trasporto nella società dell'informazione. Monitoraggio, simulazione e predisposizione di basi informative dinamiche, a cura di Gennaro Nicola Bifulco. ISBN 88-7999-857-9 Aracne editore

Ricci S. (2011). *Tecnica ed economia dei trasporti*. Ed. Hoepli (ISBN: 9788820345945).

Salvo G. (2012). *Dispense del Corso in "Tecnica ed economia dei trasporti"*. Università degli Studi di Palermo.



## **CAPITOLO 3**

### **Tecniche di rilevamento tradizionali dei dati di traffico**

#### **3.1 Introduzione**

Come descritto nel capitolo precedente, un qualsivoglia modello di stima del deflusso stradale necessita di una fase di rilievo dei flussi stradali finalizzata alla determinazione delle reali condizioni di traffico della rete. Il rilevamento dei dati di traffico risulta essere, quindi, un elemento di fondamentale importanza per tutte le attività che possono interessare in modo più o meno diretto il complesso sistema della mobilità, sia in ambiti territoriali ristretti, quali una singola intersezione, che in ambiti grandi, quali le strade di lunga percorrenza. In particolare i rilievi di alcune grandezze, siano esse quantitative che qualitative, caratterizzanti i flussi veicolari che transitano su un tronco stradale concorrono alla definizione del quadro analitico della mobilità e, grazie ad un loro continuo e costante aggiornamento, possono costituire un elemento di fondamentale importanza per lo sviluppo del territorio.

Nella rimanente parte del capitolo vengono esaminate brevemente le principali tecniche tradizionali di rilevamento dei dati del traffico, ampiamente descritte nell'Allegato 2 delle "Linee guida per la progettazione dei sistemi di monitoraggio del traffico" emanato nel 2002 dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ed in un rapporto redatto dall'ENEA del 2011.

## **3.2 Tecniche di rilevamento manuale**

I metodi manuali di rilevamento dei dati di traffico si basano sull'impiego di uno o più operatori che registrano alcuni dati relativi al traffico quali il numero e la tipologia di veicoli che transitano in un determinato intervallo temporale; inoltre, qualora sia utile ai fini dei rilevamenti, è possibile anche valutare anche ulteriori dati quali ad esempio le manovre dei veicoli ed il comportamento dei guidatori.

La registrazione dei dati di traffico può essere effettuata utilizzando dei moduli cartacei oppure utilizzando gli apparecchi conta-colpi. Nel primo caso si dovranno riportare sulle schede, per ogni categoria di veicolo individuata, i dati di traffico rilevati quali ad esempio il numero dei veicoli transitati, il totale di veicoli relativo all'intera durata del rilevamento, il totale relativo ad intervalli di durata inferiore ma significativi, nonché alcune statistiche utili per una migliore interpretazione dei flussi; nel secondo caso, invece, l'operatore tramite l'utilizzo di un apparecchio conta-colpi, semplice strumento il cui funzionamento può essere sia meccanico che elettronico, suddivide i veicoli che transitano nelle varie categorie.

L'impiego degli osservatori presenta dei limiti naturali che possono non garantire la correttezza e l'esattezza delle informazioni rilevate quali ad esempio la non istantanea velocità di registrazione dei dati dovuta ai tempi di reazione relativamente lunghi (variabili tra 0,5 e 2 secondi) di ciascun operatore ed i problemi dovuti all'affaticamento degli stessi che determina una minore attendibilità all'aumentare del tempo di rilevamento (si ritiene che un addetto al rilevamento sia efficiente per un periodo massimo di circa 3 ore).

Nei sotto-paragrafi seguenti vengono descritti le due principali tecniche di rilevamento manuale del traffico: il metodo dell'osservatore fisso e quello dell'osservatore mobile.

### **3.2.1 Il rilevamento con il metodo dell'osservatore fisso**

Il metodo manuale dell'osservatore fisso rappresenta la più semplice e antica tecnica di valutazione dei parametri caratteristici principali di un flusso veicolare in un tronco stradale quali ad esempio la portata, la densità e la velocità media.

Se viene effettuato da un unico osservatore posizionato per un tempo  $T$  in corrispondenza di una sezione stradale è possibile solamente effettuare il conteggio dei veicoli in transito

per la sezione e, pertanto, il solo parametro del deflusso a cui si può risalire è la portata  $q$ , valutabile semplicemente come:

$$q = \frac{n}{T} \quad (5)$$

essendo  $n$  il numero di veicoli rilevati nel periodo di osservazione  $T$ .

Se invece il rilevamento è eseguito per un tempo  $T$  da più osservatori fissi posizionati in corrispondenza di due sezioni del tronco stradale di lunghezza  $L$ , oltre alla portata stradale è possibile risalire assumendo che si verifichino condizioni stazionarie di deflusso anche alla densità ed alla velocità media del flusso in esame se gli osservatori rilevassero per ciascuno dei veicoli in transito sia il tipo sia l'istante in cui avviene l'attraversamento. Questo tipo di analisi non risulta particolarmente agevole per flussi di traffico elevati in quanto richiede particolare attenzione sia in fase di rilievo che durante il lavoro di analisi ed interpretazione dei dati rilevati. Oltre al flusso veicolare determinabile con la precedente formula (5), per ciascuno degli  $n$  veicoli transitanti nel tempo di osservazione  $T$  nel tronco stradale considerato è possibile determinare il  $t_i$  che ciascun veicolo osservato impiega per percorrere il tronco stesso, cioè:

$$t_i = t_{1i} - t_{2i} \quad (6)$$

dove  $t_{1i}$  e  $t_{2i}$  rappresentano rispettivamente gli istanti di attraversamento dell' $i$ -esimo veicolo della sezione iniziale e finale del tronco di strada in esame.

Inoltre, è possibile valutare la densità ( $k$ ) e la velocità media ( $v_s$ ) del flusso veicolare nel tronco stradale con le seguenti espressioni:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{T \cdot L} \quad (7)$$

$$v_s = \frac{q}{k} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i / L} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n 1/v_{si}} \quad (8)$$

dove  $v_{si} = L / t_i$  è la velocità media di un generico veicolo sul tronco stradale  $L$ .

### 3.2.2 Il rilevamento con il metodo dell'osservatore mobile

La tecnica dell'osservatore mobile, elaborata da Wardrop nel 1954, consente la valutazione dei principali parametri del flusso veicolare (portata, densità, velocità media, tempo di percorrenza medio) che interessa ciascuno dei due sensi di marcia di un tronco stradale. Tale metodo si basa su una serie di rilevamenti effettuati a bordo di un veicolo di osservazione mobile, al quale si fa percorrere il tratto stradale di interesse (lungo  $L$ ) in ciascuno dei due sensi di marcia.

Quando il veicolo di osservazione mobile percorre il tronco stradale  $L$  nello stesso verso del flusso veicolare che si vuole esaminare, gli operatori (due o tre) presenti a bordo del veicolo rilevano il numero  $n_1$  di veicoli sorpassati, il numero  $n_2$  di veicoli che sorpassano ed il tempo  $T_A$  di percorrenza del tratto stradale. Se il veicolo si muove con una velocità media  $v_A = L / T_A$ , per il flusso veicolare in esame è stata definita la seguente relazione:

$$\frac{n_A}{T_A} = q - k \cdot v_A \quad (9)$$

dove  $q$  è la portata del flusso veicolare,  $k$  la densità del flusso veicolare e  $n_A$  rappresenta la differenza (col segno che compete) tra i veicoli che hanno sorpassato il veicolo test ( $n_2$ ) e quelli che sono stati sorpassati ( $n_1$ ).

Una volta percorso il tronco stradale nello stesso verso del flusso veicolare che si vuole esaminare, il veicolo di osservazione mobile percorre il tronco nel senso di marcia opposto; in questo secondo spostamento vengono rilevati il numero  $n_R$  di veicoli viaggianti controcorrente rispetto al veicolo test (ovvero il numero di veicoli in movimento nel senso del flusso veicolare in esame) ed il tempo  $T_R$  di percorrenza del tratto stradale da parte del veicolo di osservazione mobile. Se quest'ultimo si muove con una velocità media  $v_R = L / T_R$ , per il flusso veicolare in esame vale in questo caso la seguente relazione:

$$\frac{n_R}{T_R} = q + k \cdot v_R \quad (10)$$

dove  $q$  e  $k$  sono sempre la portata e la densità del flusso.

A partire dalle due precedenti equazioni, dopo alcuni semplici passaggi matematici, è possibile esprimere la portata  $q$  del flusso veicolare in esame come:

$$q = \frac{n_A + n_R}{T_A + T_R} \quad (11)$$

Pertanto, per conoscere il flusso di traffico in una certa direzione, su un tronco di strada a doppio senso di marcia, basterà che il veicolo di osservazione mobile percorra il tratto due volte, una in andata ed una in ritorno, rilevando il suo tempo di percorrenza ed il flusso veicolare sia nelle condizioni di andata ( $T_A$ ,  $n_A$ ) che in quelle di ritorno ( $T_R$ ,  $n_R$ ).

Inoltre, è possibile ricavare anche il tempo medio di percorrenza ( $T$ ), la velocità media ( $v$ ) e la densità ( $k$ ) del flusso veicolare preso con le seguenti espressioni:

$$T = T_A - \frac{n_A}{q} \quad (12)$$

$$v = \frac{L}{T} \quad (13)$$

$$k = \frac{q}{v} \quad (14)$$

### 3.3 Tecniche di rilevamento con sistemi automatici

La necessità di raccogliere con continuità e accuratezza i dati relativi al traffico ha indotto la ricerca tecnologica del settore a produrre strumenti e sistemi di rilevamento sempre più raffinati. In linea di principio, un sistema automatico di misura dei parametri del traffico è costituito da quattro componenti base:

- un sensore, dispositivo costituito da un materiale sensibile ad una grandezza descrittiva del fenomeno, che emette un segnale in corrispondenza di una variazione del valore della grandezza;
- un rilevatore (o un apparecchio di misura), dispositivo in genere elettronico capace di codificare il segnale prodotto dal sensore;
- un trasmettitore, ossia un sistema di trasmissione delle informazioni codificate dal sensore al rilevatore e da questo all'elaboratore;
- un elaboratore, che fornisce dati elaborati a partire dai dati dei rilevatori.

Le tecniche di monitoraggio automatico si basano sulla rilevazione di una o più di una delle perturbazioni indotte dal passaggio veicolare sull'ambiente circostante, quali ad esempio le seguenti:

- Peso (sensori WIM, tubi pneumatici; sensori triboelettrici);
- Emissione di onde meccaniche (sensori acustici passivi, sensori ad ultrasuoni);

- Riflessione di radiazioni visibili (sensori video);
- Riflessione di radiazioni invisibili (sensori ad infrarossi, microonde, radio);
- Induzione elettromagnetica (spire induttive, sensori magnetodinamici).

Per rilevare queste perturbazioni, sono stati realizzati sensori che utilizzano i più diversi fenomeni fisici, tra cui:

- Deformazione elastica (tubi pneumatici e sensori a celle di carico);
- Elettrizzazione per strofinio (cavi triboelettrici);
- Proprietà piezoelettriche dei cristalli (sensori piezoelettrici);
- Geomagnetismo (sensori magnetodinamici);
- Capacità elettrica (sensori capacitivi);
- Effetto Doppler (radar);
- Radiazioni elettromagnetiche a diverse frequenze.

Il sensore, in funzione del principio fisico su cui si basa (peso, variazione di campo magnetico, variazione della frequenza di onde, ecc.) rileva la presenza di un oggetto (veicolo) senza tuttavia essere in grado di classificarlo. Alcuni dispositivi rilevano il passaggio di un veicolo in un'area di rilevazione (ad esempio le spire ad induzione magnetica), ma non consentono di rilevarne la velocità. Altri dispositivi sfruttano proprio la velocità del veicolo per rilevarne il passaggio (radar Doppler) e sono quindi in grado di effettuare sia il conteggio veicolare che la misura della velocità. Altri ancora sono costruiti in modo da effettuare una duplice misura, in due sezioni consecutive della via, e rilevare in questo modo la velocità veicolare. Infine, alcuni sensori effettuano una misura puntuale della grandezza descrittiva del fenomeno, mentre altri eseguono più misure lungo un asse o entro un'area e consentono quindi una migliore caratterizzazione dei veicoli transitati per lunghezza o tipo (sensori magnetodinamici, sistemi video) o della loro traiettoria (sistemi video a tracciamento).

A seconda delle modalità di installazione, poi, i sensori fissi si distinguono in sensori intrusivi, collocati all'interno della pavimentazione stradali e quindi sostanzialmente inamovibili, e sensori non intrusivi, che vengono collocati su supporti a lato o al di sopra della strada. I sotto-paragrafi seguenti riportano le tecniche di rilevamento automatico del traffico maggiormente utilizzate per effettuare il monitoraggio del traffico.

### 3.3.1 Il rilevamento con tubi pneumatici

La tecnica di rilevamento con tubi pneumatici consente di effettuare la misura delle portate stradali attraverso il posizionamento di un tubo di gomma pieno d'aria steso sulla pavimentazione stradale in modo ortogonale alla direzione dei flussi di traffico tenuto in posizione da appositi ganci fissati sulla superficie bituminosa. Quando le ruote di un veicolo schiacciano il tubo pneumatico viene generata al suo interno un'onda di pressione che aziona un interruttore a membrana inserito in un circuito elettrico alimentato a batteria originando un impulso nel contatore; in tal modo l'apparecchio rilevatore effettua il conteggio dei veicoli facendo corrispondere ad ogni coppia di azionamenti dell'interruttore a membrana, ovvero al passaggio consecutivo di due assi sul tubo, un'unità di vettura equivalente (u.v.e.).

I vantaggi del rilevamento con tubi pneumatici risiedono nella facilità di installazione e rimozione dei sensori, nel costo contenuto e nella possibilità di garantire un funzionamento con batterie di autonomia di alcuni giorni. Gli svantaggi di tale tecnica sono però diversi:

- l'imprecisione di conteggio nel caso di flussi elevati (errori superiori al 20%);
- l'impossibilità di ricavare i dati del transito dei veicoli multiassiali, infatti un camion con sei assi viene rilevato come tre u.v.e.;
- il rischio di rottura meccanica del tubo ad opera soprattutto dei mezzi pesanti;
- il pericolo di stacco del tubo dalla pavimentazione stradale, il che potrebbe trasformare il tubo stesso in una specie di frusta con conseguenti rischi per pedoni e motociclisti.



Figura 3 – elementi costitutivi di un cavo triboelettrico.

### 3.3.2 Il rilevamento con cavi triboelettrici

La tecnica di rilevamento con cavi triboelettrici è molto simile a quella che fa ricorso a tubi pneumatici e consiste nel posizionare nella pavimentazione stradale un cavo triboelettrico in direzione ortogonale ai flussi di traffico collegato ad un rilevatore posizionato al margine della strada. Nello specifico, il cavo triboelettrico è costituito da un conduttore centrale circondato da materiale dielettrico, da un anello esterno di fili di acciaio intrecciati liberamente attorno al dielettrico e da un robusto rivestimento di plastica esterno (figura 4). I sensori triboelettrici possono essere utilizzati per rilevamenti sia temporanei che fissi. Nel primo caso, il cavo viene fissato alla superficie stradale usando un appropriato adesivo ovvero dei ganci, per cui l'installazione risulta rapida ed economica. Nel secondo caso, al fine di assicurare al cavo una maggiore protezione, è conveniente effettuare un taglio nella pavimentazione bituminosa e adagiarvi il sensore in modo leggermente sporgente rispetto alla superficie stradale.

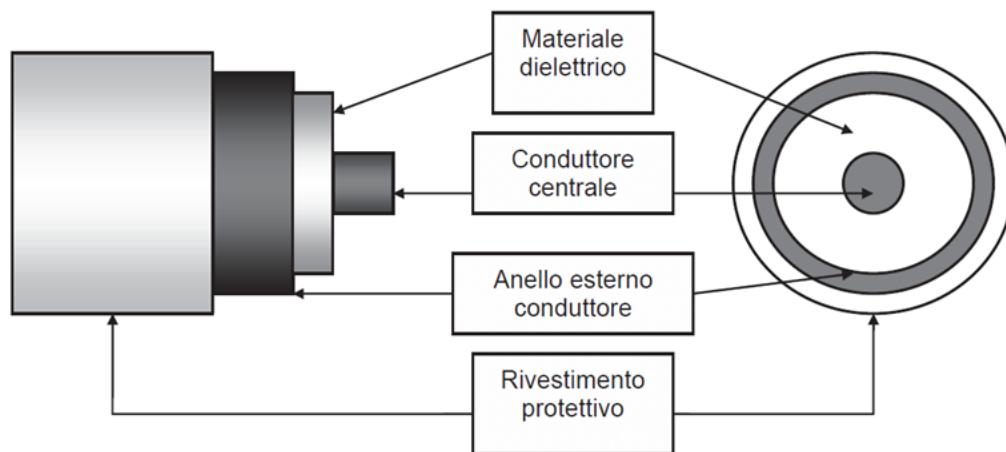


Figura 4 – elementi costitutivi di un cavo triboelettrico

Il principio di funzionamento dei sensori triboelettrici si basa sull'effetto triboelettrico, ovvero l'elettrizzazione per strofinio di un materiale dielettrico, quando le ruote di un veicolo passano sul cavo, i fili di acciaio dell'anello esterno del cavo sfregano la superficie del materiale dielettrico, elettrizzandolo, e provocando così un accumulo di carica elettrica; ciò comporta l'invio di un segnale elettrico e quindi la registrazione del passaggio dell'asse del veicolo. Pertanto, similmente ai tubi pneumatici, i cavi triboelettrici effettuano il conteggio dei veicoli in transito a partire dal rilevamento degli assi dei veicoli stessi. Rispetto però ai tubi pneumatici, i sensori triboelettrici sono da preferire poiché risultano più robusti e resistenti, meno visibili e comunque non molto più costosi.



### 3.3.3 Il rilevamento con spire induttive

Il sistema di rilevamento dei dati del traffico con spire induttive, una delle tecniche di misura più ampiamente utilizzate, è costituito da una o più spire posizionate in corrispondenza della carreggiata e collegate ad un apparecchio rilevatore posizionato ai margini della carreggiata. In particolare, una spira induttiva è un avvolgimento di comune filo elettrico costituita normalmente da uno o due giri di filo disposti secondo una forma quadrata o rettangolare collegati ad un generatore a batteria che, erogando della corrente elettrica, genera un campo magnetico. Le spire consentono la misura della portata veicolare in transito e possono essere installate in due differenti modi:

- sopra la pavimentazione stradale, per realizzare dei rilevamenti temporanei. In questo caso le spire sono ancorate al manto stradale con appositi ganci, inoltre, sono coperte con strisce di tela catramata al fine di impedirne il tranciamento al passaggio dei veicoli;
- annegate nella pavimentazione bituminosa, per realizzare dei rilevamenti più duraturi. In tal caso le spire interrato sono più protette rispetto a quelle appoggiate sulla superficie stradale, ma ciò non esclude che siano soggette a tensioni e torsioni, dal momento che il letto stradale tende a muoversi al passaggio dei veicoli pesanti e ai cambiamenti di temperatura.

Il principio di funzionamento di tale tecnica di rilevamento si basa sulla variazione del campo magnetico generato dalla corrente elettrica che attraversa la spira causata dal passaggio della massa metallica di un autoveicolo che vi transita sopra. Questa variazione produce un segnale elettrico dura per tutto il tempo di permanenza del veicolo nella zona di rilevazione consentendo in tal modo la segnalazione della presenza del veicolo e quindi il conteggio. È opportuno precisare che il tempo di occupazione da parte di un veicolo della zona di rilevazione dipende dalla lunghezza del veicolo stesso, nonché dal suo tempo di passaggio.

Con una singola spira (Single-Loop) si misurano la portata veicolare e la densità, con due spire induttive disposte su una stessa corsia (Double-Loop) è possibile risalire alla velocità istantanea dei veicoli in transito. Collegando ad un unico apparecchio rilevatore due spire di dimensioni note (con lato  $l_s$ ) e poste ad una distanza mutua prefissata  $d$  (circa 1m) la velocità istantanea del generico veicolo può essere valutata come

$$v_i = \frac{l_s + d}{t_{2i} - t_{1i}} \quad (15)$$

dove  $t_{1i}$  e  $t_{2i}$  sono gli istanti d'ingresso sulla prima e sulla seconda spira.

I vantaggi della tecnica di rilevamento con spire induttive risiedono nella facilità di installazione dei sensori e nel costo contenuto, imputabile in massima parte ai lavori di installazione. Questa tecnica di misura può comportare, tuttavia, una certa distorsione dei dati; infatti le spire conteggiano accuratamente i veicoli viaggianti ad alta velocità, ma generano errori considerevoli nei casi di basse velocità o di veicoli in fase di arresto.

Inoltre per installarle occorre interdire il traffico ed utilizzare squadre e mezzi specializzati in lavori stradali. Accade spesso poi che interventi e scavi successivi o la semplice dilatazione del bitume dovuta alle variazioni di temperatura che esso sopporta durante il ciclo stagionale o, ancora, il passaggio di mezzi pesanti, causino la rottura del sensore richiedendo costosi interventi di manutenzione. Tale sensore inoltre, una volta installato, non è mobile. La figura seguente riporta, nella parte sinistra, la fase di posa in opera di una spira in configurazione double-loop e, nella parte destra, l'installazione completa.



Figura 5 - A sinistra posa in opera di spire induttive in configurazione double-loop, a destra il risultato finale

### 3.3.4 Il rilevamento con sensori piezoelettrici

I sensori piezoelettrici sfruttano le proprietà piezoelettriche dei cristalli di quarzo che, quando sono sottoposti ad una sollecitazione dinamica, si elettrizzano formando delle distribuzioni non omogenee di elettricità e quindi una differenza di potenziale sulle due facce sollecitate. L'intensità di polarizzazione e quindi la differenza di potenziale tra le due facce è proporzionale all'intensità della sollecitazione, oltre che dalla direzione rispetto

agli assi del cristallo. Poiché l'effetto piezoelettrico è dinamico, si manifesta cioè quando la sollecitazione del cristallo è variabile nel tempo, la carica di polarizzazione decade se la sollecitazione rimane costante. I sensori piezoelettrici sono quindi adatti ad effettuare misure di peso dei veicoli in marcia e, sono realizzati principalmente in due differenti forme, i cavi e le lastre.

La tecnica di rilevamento con sensori assiali piezoelettrici prevede l'utilizzo di un cavo piezoelettrico disposto perpendicolarmente alla direzione di transito dei veicoli, e di un registratore elettronico posizionato al margine della carreggiata. I sensori piezoelettrici possono essere utilizzati per rilevamenti sia temporanei che permanenti. Nel primo caso, il cavo viene fissato alla superficie stradale; nel secondo caso, esso viene installato all'interno della pavimentazione bituminosa, previa incapsulazione in una barra di resina che gli assicura una buona resistenza meccanica. Un sensore piezoelettrico installato in una corsia stradale permette l'immediata registrazione sia del passaggio degli assi di un veicolo sia del carico di ciascun asse; pertanto, se propriamente installati e calibrati, questi sensori e le logiche elettroniche ad essi associate consentono di effettuare non soltanto il conteggio dei veicoli in transito, ma anche la loro pesatura dinamica.

Disponendo una coppia di sensori piezoelettrici per corsia e collegando contemporaneamente i due sensori ad una stazione mobile risulta possibile ottenere l'acquisizione, dal primo sensore, del carico dell'asse, mentre il secondo, distanziato dal primo, serve a calcolare geometrie degli assi e velocità. In dettaglio, una coppia di sensori piezoelettrici installati su una corsia stradale è in grado di fornire, per ogni veicolo in transito, i seguenti dati: numero di assi; peso di ciascun asse e peso totale del veicolo; distanze reciproche tra gli assi e lunghezza complessiva; velocità.

I sensori piezoelettrici a piastra risultano costituiti da due lunghe e sottili lamine conduttrici in acciaio inox fra le quali è interposto un materiale isolante. Il sensore, che realizza un largo condensatore, viene fissato alla pavimentazione di ogni corsia stradale (trasversalmente alla direzione di transito dei veicoli) e risulta associato ad un modulo elettronico posizionato a bordo strada. Quando le ruote dell'asse di un veicolo transitano sopra il sensore, la pressione esercitata sulle armature metalliche provoca un incremento della capacità del condensatore stesso; ciò comporta l'invio di un segnale al modulo elettronico, il quale lo converte in misure di peso. In sostanza, un rilevatore a piastra installato in una corsia stradale consente l'immediata registrazione sia del passaggio del veicolo, sia del carico di ogni suo asse, sia del peso veicolare complessivo, il che rende anche possibile una classificazione per tipologia di tutti i veicoli in transito.

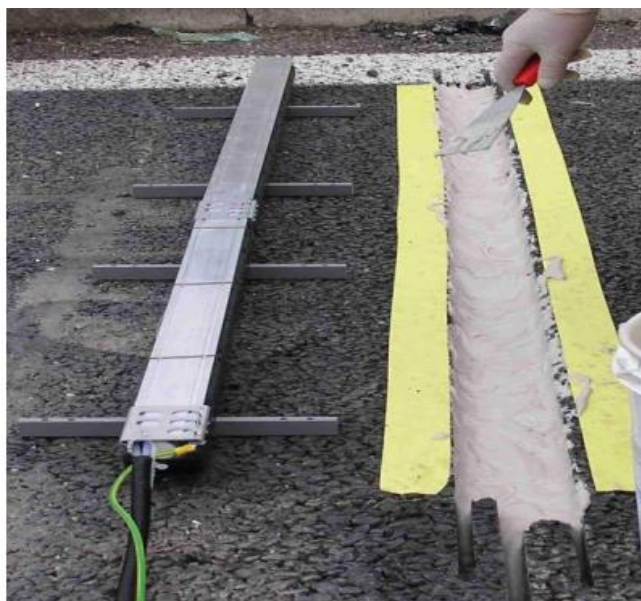


Figura 6 - Installazione di una piastra piezoelettrica al quarzo

I vantaggi del rilevamento con sensori piezoelettrici risiedono nella facilità di installazione dei cavi e nella possibilità di acquisizione di un ventaglio di informazioni. Gli svantaggi sono legati al costo più elevato rispetto agli altri sensori a pressione, alla non elevata affidabilità, al rischio di rottura meccanica dei cavi ed alla loro non determinata durata di funzionamento.

### 3.3.5 Il rilevamento con sensori magnetodinamici

I sensori magnetodinamici o sensori VMI (“vehicle magnetic imaging”) sono dei sensori di tipo intrusivo in grado di rilevare una vasta gamma di dati di traffico quali il passaggio dei veicoli, la velocità di transito, la lunghezza veicolare ed il tempo di occupazione della sezione stradale. Un sensore VMI ha l’aspetto di una piastra rettangolare di piccole dimensioni, è costituito essenzialmente da un microprocessore alimentato da batterie ricaricabili e può essere impiegato in due differenti modalità:

- come rilevatore semi-permanente, ovvero per rilevamenti prolungati su una stessa sezione stradale. In questo caso il sensore VMI deve essere alloggiato all’interno di una fessura verticale praticata nella pavimentazione stradale in maniera tale che esso risulti protetto sia dalle sollecitazioni derivanti dal transito dei veicoli che da eventuali atti vandalici;
- come rilevatore portatile, ossia per rilevamenti di breve durata da svolgersi in diverse sezioni stradali in cui il sensore magnetodinamico può essere installato sulla

superficie del piano viabile purché inserito all'interno di un idoneo alloggiamento metallico resistente alle sollecitazioni da fissare con appositi chiodi alla pavimentazione bituminosa (figura 7).

In entrambi i casi, il sensore VMI deve essere posizionato in corrispondenza della mezzeria della corsia stradale oggetto di rilevamento.



Figura 7 – Sensore magnetodinamico installato sulla superficie del piano viabile utilizzato come rilevatore portatile di dati di traffico.

I sensori magnetodinamici rilevano il passaggio dei veicoli stradali basandosi sull'analisi della variazione del campo magnetico terrestre indotte dall'interferenze provocate dalle componenti metalliche del veicolo. Nello specifico, ad ogni variazione di campo magnetico il rilevatore produce un segnale elettrico direttamente proporzionale alla massa magnetica veicolare che lo ha provocato; questo, a sua volta, dopo essere stato analizzato dal microprocessore del sensore, viene immagazzinata nella sua memoria interna. Ultimata la registrazione in sito, i dati memorizzati possono essere trasferiti analizzati in un PC da uno specifico software, che organizza e restituisce un'ampia gamma di informazioni sul flusso di traffico rilevato; in particolare si possono ottenere conteggi veicolari, misure di velocità, tempi di occupazione, lunghezze veicolari, distanziamenti temporali. I vantaggi della tecnica di rilevamento con sensori VMI risiedono nella facilità di installazione e rimozione dei rilevatori (dovuta alle loro dimensioni contenute), nella possibilità di garantire lunghi periodi di conteggio grazie al funzionamento con batterie di autonomia elevata (circa 90 giorni), nella precisione di conteggio, nella possibilità di rilevare veicoli viaggianti sia ad alta che a bassa velocità, nonché nella possibilità di acquisizione di ulteriori dati di traffico di interesse.

### 3.3.6 Il rilevamento con sensori a microonde

I “microwave radar”, o sensori a micro-onde, sono dei dispositivi di rilevamento di dati di traffico di tipo non intrusivo che vengono installati fuori dalla sede viaria generalmente in un palo posto a bordo strada oppure, in alternativa, al di sotto di un cavalcavia sovrastante la strada stessa. Tali sensori possono essere di due tipi: il “Doppler microwave radar” e il “true-presence microwave radar”.

La prima tipologia, ovvero il radar ad effetto Doppler chiamato anche “cinemometro”, è costituito essenzialmente da un’antenna bi-direzionale che emette e riceve onde elettromagnetiche a frequenza costante, circa 10 GHz.

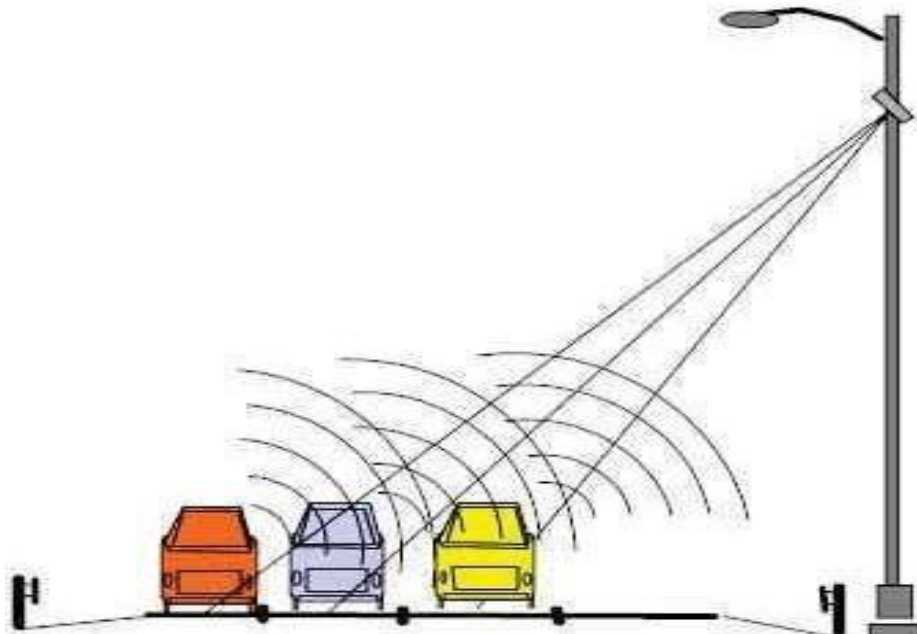


Figura 8– Schema del principio di funzionamento di un sensore radar ad effetto Doppler

Il principio di funzionamento del sensore si basa sull’effetto Doppler-Fizeau, consistente nella modificazione della frequenza di un’onda elettromagnetica in presenza di moto relativo tra sorgente e ricevitore; nello specifico, quando l’onda di frequenza  $f$  emessa dall’antenna (sorgente fissa) incontra un veicolo in transito (sorgente mobile) quest’ultimo, a causa dell’effetto Doppler, riceve un’onda di frequenza variata ( $f'$ ) che, a sua volta, viene rilevata dall’antenna con frequenza nuovamente variata ( $f''$ ). In definitiva, la frequenza  $f''$  dell’onda riflessa ricevuta dall’antenna risulta differente da quella dell’onda emessa ( $f$ ) e il rilevamento da parte del sensore di tale variazione di frequenza denota il passaggio del veicolo. La differenza tra la frequenza emessa e la frequenza riflessa viene chiamata “frequenza Doppler-Fizeau” ( $F_d$ ); essa risulta proporzionale alla velocità istantanea  $v$  del

veicolo rilevato, inversamente proporzionale alla lunghezza dell'onda emessa  $\lambda$  e dipende inoltre dall'angolo  $\phi$  che il fascio d'onde emesso forma con il vettore velocità del veicolo; in altri termini:

$$F_d = f'' - f = \frac{2 \cdot v \cdot \cos \phi}{\lambda} \quad (16)$$

dove  $F_d$  è espressa in Hz,  $v$  in m/s,  $\lambda$  in m e  $\phi$  è, in genere, assunto pari a  $25^\circ$ .

In virtù della proporzionalità tra la “frequenza Doppler-Fizeau” e la velocità del veicolo, il sensore a microonde è in grado di effettuare non soltanto il conteggio dei veicoli che attraversano il suo campo di rilevamento, ma anche la misura diretta della loro velocità istantanea. La precisione di rilevazione delle velocità da parte di tale sensore è di circa 2 Km/h fino a 100 Km/h; tuttavia una tolleranza di 10 Km/h è accettata. Va inoltre sottolineato che i “Doppler microwave radar” non possono rilevare i veicoli fermi o viaggianti a velocità molto basse (approssimativamente inferiore a 3 Km/h).

La seconda tipologia di radar a microonde è costituita dai sensori “true-presence microwave radar” in cui la frequenza dell'onda elettromagnetica emessa varia continuamente nel tempo (onda modulata). Tale tipo di strumento, oltre al conteggio dei veicoli attraversanti il suo campo di azione ed alla misura diretta delle loro velocità consente di rilevare anche i veicoli fermi, per cui se collegato ad una centrale di controllo remota permette di segnalare in tempo reale eventuali incidenti.

Entrambe le tipologie di radar a microonde presentano il vantaggio di non essere influenzate dalle condizioni atmosferiche, evitando problemi di degrado delle prestazioni a causa del maltempo o della nebbia. Tuttavia tali sensori risultano più costosi rispetto ai tradizionali rilevatori installati sulla superficie stradale, anche se nel lungo termine possono dimostrarsi più economici grazie al modesto onere di manutenzione.

### **3.3.7 Il rilevamento con sensori a raggi infrarossi**

Gli “infrared detectors”, o sensori a raggi infrarossi, sono degli strumenti di tipo non intrusivo che possono essere di due tipologie: i sensori passivi, in grado di rilevare solamente il passaggio dei veicoli, e quelli attivi, che riescono anche ad effettuare la misura diretta della velocità.

I sensori di tipo passivo si compongono essenzialmente di un apparecchio ricevitore in grado di rilevare l'energia delle radiazioni infrarosse emesse dalla pavimentazione stradale o dalla superficie dei veicoli attraversanti la sua zona di influenza. Per poter effettuare la misura delle portate stradali, il sensore è installato al di sopra della mezzeria di ogni corsia, su opere d'arte che sovrastano la carreggiata. Al passaggio di un veicolo, il dispositivo rileva un'energia radiante nel campo dell'infrarosso diversa da quella emessa dalla superficie stradale in assenza del veicolo; il rilevamento di tale variazione di energia denota allora il passaggio del veicolo.

I dispositivi di tipo attivo, installati in modo simile a quelli di tipo passivo, sono costituiti da una sorgente e da un ricevitore di raggi infrarossi. Il rilevamento diretto della velocità di un veicolo risulta possibile disponendo una coppia di sensori a coppia su di un unico supporto a breve distanza fra loro; nello specifico la velocità viene calcolata misurando il tempo che intercorre tra l'azionamento dei due sensori dovuto all'interruzione dei fasci a raggi infrarossi.

Le due tipologie di sensori a raggi infrarossi presentano il vantaggio di non causare disturbo alla circolazione stradale durante la loro installazione e di non creare problemi di degradamento delle prestazioni in presenza di nebbia, problemi che invece risultano significativi in condizioni di pioggia o neve.

La figura sottostante riporta un possibile schema di configurazione di due sensori laser a raggi infrarossi posizionati sopra il centro di ogni carreggiata stradale.

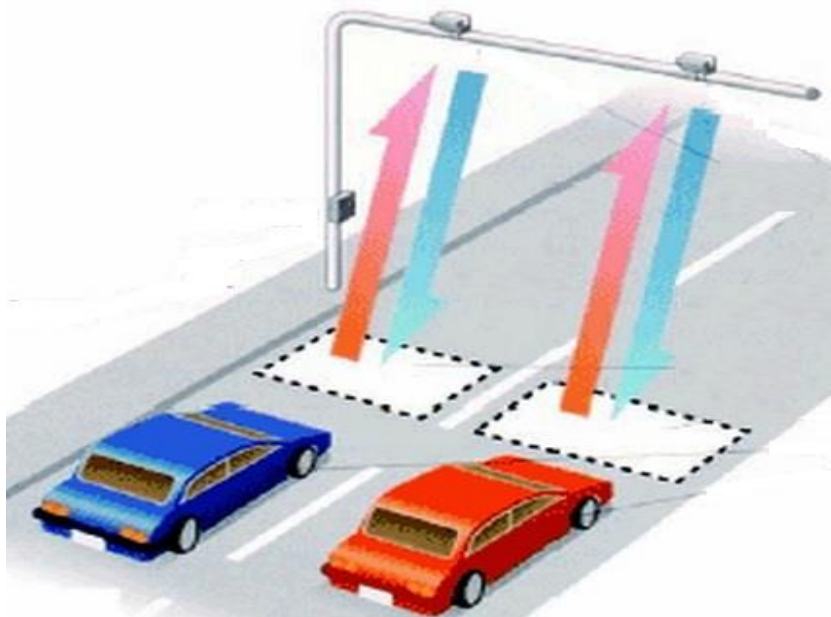


Figura 9 - possibile schema di configurazione di due sensori laser a raggi infrarossi posizionati sopra il centro di ogni carreggiata stradale



### 3.3.8 Il rilevamento con sensori acustici

I sensori acustici sono degli strumenti di tipo non intrusivo, generalmente installati in corrispondenza del centro di ogni corsia al di sotto di un cavalcavia sovrastante la strada stessa, in grado di rilevare alcuni parametri del traffico. In particolare, i sensori passivi sono in grado di rilevare solamente il passaggio dei veicoli (portata e tasso di occupazione) mentre, quelli ad ultrasuoni (sensori attivi) sono in grado di rilevare anche la velocità di transito, qualora ne vengono posizionati due a breve distanza l'uno dall'altro.

I sensori ad ultrasuoni sono degli strumenti di piccole dimensioni costituiti essenzialmente da un generatore e da un ricevitore di onde sonore il cui principio di funzionamento si basa sul fenomeno della riflessione delle onde sonore, secondo cui il tempo impiegato da un'onda per lasciare la sorgente, rimbalzare su una superficie riflettente (posta ortogonalmente alla direzione di propagazione) e ritornare alla sorgente stessa è direttamente proporzionale alla distanza tra la sorgente e la superficie di riflessione. Sfruttando tale fenomeno il sensore misura la sua distanza dalla superficie riflettente, che può essere la strada o la parte superiore di un veicolo, e sulla base di tale distanza riconosce il passaggio dei veicoli riuscendo anche a classificarli per categorie (autovetture, furgoni, camion, ecc.).

I vantaggi del rilevamento con tale tipo di sensori risiedono nella facilità di installazione dei sensori, nella modesta manutenzione, nell'affidabile valutazione della portata stradale e nella possibilità di distinzione delle diverse categorie di veicoli. Tuttavia tali sensori possono non garantire un grado di accuratezza elevato nella misura di altre variabili del traffico, dal momento che risultano sensibili alla temperatura ed alle turbolenze d'aria; inoltre i loro costi risultano più elevati rispetto a quelli dei tradizionali sensori installati sulla superficie stradale, soprattutto se non si dispone di supporti già esistenti.

Nell'altra tipologia di rilevatori, ossia i sensori acustici passivi, il riconoscimento dei veicoli si basa sulla misura del rumore prodotto da ogni singolo veicolo per effetto dell'azionamento delle sue parti meccaniche e dell'interazione dei pneumatici con la superficie stradale. In particolare il rilevamento dei veicoli viene effettuato posizionando per ciascuna zona di rilevazione una serie di sensori acustici posti a intervalli regolari ai margini della strada in modo tale rilevare un significativo aumento generale della pressione sonora al passaggio dei veicoli. Il loro livello di accuratezza nel riconoscimento della presenza dei veicoli su un certo tratto di strada, è relativamente basso, e pertanto sono poco impiegati nel rilevamento del traffico veicolare.

### 3.3.9 Comparazione tra le tecniche di rilevamento automatiche del traffico

Per rilevare le principali caratteristiche del traffico veicolare è possibile utilizzare una o più delle tecniche di rilevamento automatiche del traffico precedentemente descritte in funzione dell'oggetto e delle finalità del monitoraggio,. La tabella seguente riporta una comparazione tra le tecniche di rilevamento e le grandezze misurabili con ciascuna di essa.

	Conteggio degli assi veicolari	Conteggio dei veicoli	Misura della velocità	Peso dei veicoli	Tempo di occupazione	Lunghezza veicolare	Rilevamento veicoli fermi	Classificazione dei veicoli
Tubi pneumatici	x		x <sup>(1)</sup>					
Cavi triboelettrici	x							
Spire induttive		x						
Sensori piezoelettrici (classe I e II)	x			x <sup>(2)</sup>				
Sensori magnetodinamici		x	x		x	x		
Sensori a microonde (doppler e true-presence)		x	x				x <sup>(3)</sup>	
Sensori a raggi infrarossi (attivi e passivi)		x	x					x <sup>(4)</sup>
Sensori acustici (ultrasuoni e passivi)		x	x		x			

Note: <sup>(1)</sup> con i dispositivi più moderni; <sup>(2)</sup> con i soli dispositivi di classe I; <sup>(3)</sup> con i sola tipologia true-presence microwave radar; <sup>(4)</sup> con una coppia di sensori di tipo attivo.

Tabella 1- Grandezze di interesse misurabili per ciascuna tipologia di tecnica di rilevamento automatiche del traffico descritta in precedenza.

Ulteriori elementi da prendere in considerazione durante la fase di selezione del dispositivo da utilizzare sono i costi (sia iniziali che operativi), il livello di accuratezza e di aggregazione dei dati acquisiti e le caratteristiche connesse sia con l'installazione (posizione rispetto al piano stradale e alla direzione di marcia dei veicoli, facilità di montaggio e di calibrazione) che con l'esercizio (manutenzione e affidabilità dell'azione di monitoraggio).

### 3.4 Riferimenti bibliografici

Messina M.G., Valenti G., Carapellucci F., Fusco G., Colombaroni C., Gemma A., Ciccarelli G., Lo Sardo S. (2011). *Sistema di monitoraggio e previsione della mobilità veicolare per l'integrazione tra la rete della illuminazione pubblica e la rete della mobilità*. Report ENEA RdS/2011/330. [http://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/smart-city/rds-330.pdf](http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/smart-city/rds-330.pdf)

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, (2010). *Linee guida per la progettazione dei sistemi di monitoraggio del traffico*. [http://www.perlasicurezzastradale.org/public/PDF/Linee\\_Guida\\_Progettazione\\_Sistemi\\_Monitoraggio\\_Traffico.pdf](http://www.perlasicurezzastradale.org/public/PDF/Linee_Guida_Progettazione_Sistemi_Monitoraggio_Traffico.pdf)

## CAPITOLO 4

### Nuove tecniche di rilevamento dei dati di traffico

#### 4.1 Introduzione

Le tradizionali tecnologie di rilevamento automatico del traffico veicolare descritte nel capitolo precedente offrono l'indubbio vantaggio di consentire misure prolungate nel tempo e con un buon livello di affidabilità, ma presentano gli inconvenienti di essere adatte al rilievo di pochi specifici parametri del deflusso (per lo più portata e velocità) e di avere un dominio spaziale di analisi piuttosto ridotto (rappresentato dalle sole sezioni stradali in cui sono posizionati i sensori di rilevamento).

Dal secondo dopoguerra, l'uso della tecnologia nella gestione e nel trattamento delle informazioni ha assunto sempre maggiore importanza strategica per le organizzazioni e per i cittadini. A partire dagli anni novanta, in concomitanza con il boom di internet, il termine *Information and Communication Technology* (ICT) è entrato nel linguaggio comune per indicare quel complesso di scienze, metodologie, criteri, tecniche e strumenti, in grado di raccogliere, elaborare e trasmettere delle informazioni di vario tipo. Tali tipologie di applicazioni sono utilizzate anche nel settore dei trasporti, sia per quanto riguarda gli aspetti legati al trasporto delle merci che per quelli relativi allo spostamento di passeggeri. Nei paragrafi seguenti sono analizzate le principali nuove tecniche di rilevamento del traffico veicolare; in particolare, nei paragrafi 4.2 e 4.3 si sono descritte le tecniche di rilevamento dei dati del traffico attraverso l'utilizzo di fotografie aeree e quelle che utilizzano sequenze video acquisite da videocamere posizionate lungo la carreggiata.

Successivamente si è esaminata la tecnica di rilevamento basata sull'utilizzo di veicoli sonda immessi nella corrente di traffico che si intende analizzare. Infine, il paragrafo 4.5 descrive alcune tipologie di informazioni reperibili dal WEB che, se pur fornendo solamente delle informazioni di tipo qualitativo, possono essere di grande aiuto per la comprensione e l'evoluzione legate alla dinamica del traffico.

## **4.2 Il rilevamento con fotografia aerea**

Il rilevamento con fotografia aerea può essere considerata una particolare tecnica di osservazione ed analisi dei flussi di traffico di una porzione territoriale, anche molto ampia, attraverso la quale è possibile risalire ai principali parametri del flusso veicolare di ciascun tronco dell'area di studio. Tale tecnica, utilizzata a partire dalla seconda metà dello scorso secolo, consiste nell'installare una camera fotogrammetrica grandangolare ad alta definizione in grado di acquisire una sequenza di fotogrammi su un velivolo appositamente predisposto, quali ad esempio un elicottero, un aereo ultraleggero o un dirigibile.

Nei numerosi studi presenti in letteratura (Hinz, 2003; Hickman et al., 2008; Lenhart et al., 2008; Kozempel, 2009; Tuermer et al., 2010), in cui vengono generalmente usate delle sequenze di immagini aeree acquisite con una frequenza di 1-3 Hz ed aventi una risoluzione a terra di circa 25-40 cm, il rilevamento dei veicoli viene effettuato analizzando le differenze tra due immagini consecutive. Attraverso l'utilizzo di questi metodi è possibile individuare, con procedure anche in parte automatizzate, gli oggetti in movimento e monitorare nel tempo la loro posizione; di contro non è possibile rilevare le automobili che non sono in movimento, come in presenza di elevati livelli di congestione o durante le attese ai semafori. Ad esempio, Lenhart et al. (2008) nella loro procedura hanno previsto il seguente flusso di lavoro per l'interpretazione e l'analisi delle sequenze di fotografie aeree:

- Georeferenziazione e co-registrazione dei fotogrammi;
- Integrazione GIS;
- Riconoscimento dei veicoli;
- Tracciamento dei veicoli;
- Determinazione dei parametri del traffico.

La figura 10 riporta, a titolo esemplificativo, tre fotogrammi analizzati da Tuermer et al. nel 2010 in Germania (Monaco) in cui, oltre a visualizzare il fotogramma originale (a sinistra), viene riportato uno step intermedio di riconoscimento dei singoli veicoli (al centro) e l'output della procedura ossia i veicoli riconosciuti (parte destra della figura).



Figura 10 – Fotogramma aereo acquisito in Germania (Monaco) da Tuermer et al. nel 2010 in cui vengono visualizzati a sinistra il fotogramma originale, al centro uno step intermedio di riconoscimento dei singoli veicoli e, a destra, i veicoli riconosciuti.

Tale tecnica di monitoraggio risulta essere poco utilizzata per realizzare dei monitoraggi periodici dei flussi di traffico in quanto è caratterizzata da elevati costi operativi, dall'influenza delle condizioni meteorologiche e dal non facile lavoro di processamento delle immagini.

### **4.3 Il rilevamento con immagini video**

Il monitoraggio del traffico attraverso l'utilizzo di telecamere è una procedura non intrusiva che, a partire dalle prime applicazioni effettuate negli anni 70, ha consentito di analizzare con maggior accuratezza la dinamica e l'evoluzione nel tempo dei flussi di traffico. Attraverso la video-sorveglianza del traffico stradale è possibile:

- acquisire una grande quantità di informazioni relativi sia i parametri tipici del deflusso veicolare (quali portata, velocità e densità) che altri dati di traffico difficilmente reperibili con i metodi tradizionali (quali tipologia dei veicoli in transito, tasso di occupazione di un tronco stradale, presenza e lunghezza di coda, manovre di svolta, cambi di corsia, arresto dei veicoli, ecc.);
- avere un esteso dominio spaziale di analisi, il che rende possibile non soltanto rilevamenti puntuali su sezioni di infrastruttura, ma anche il monitoraggio di un ampio tratto del ramo stradale di interesse;
- migliorare la qualità delle informazioni, garantendo in condizioni ordinarie percentuali di errore molto contenute;
- effettuare applicazioni multiple, che vanno dal monitoraggio dei flussi di traffico alla sorveglianza dello stato e delle condizioni dell'infrastruttura viaria osservata;
- acquisire dati di interesse utili alla calibrazione e validazione dei modelli di simulazione del traffico.

I sistemi di video-sorveglianza del traffico oggi sono notevolmente diffusi, sia in ambito urbano che nei contesti extraurbani (figura 11), ma la loro applicazione è notevolmente onerosa e non esclude eventuali difficoltà operative legate essenzialmente a:

- le condizioni meteorologiche, che possono alterare la leggibilità delle immagini;

- le condizioni ambientali, quali la variabilità della luminosità nell'arco della giornata, gli effetti di abbagliamento dovuti al sole sotto certe inclinazioni o il mascheramento di una porzione di video dovuto alla vegetazione o ai veicoli di grande sagoma;
- gli effetti distorcenti derivanti dalla visione prospettica delle immagini.



Figura 11 – Telecamere per la video-sorveglianza del traffico in ambito urbano (a sinistra) ed in un contesto extraurbano (a destra)

La precisione con la quale tali tipologie di sistemi sono in grado di identificare i veicoli che in transitano risulta essere strettamente legata all'altezza di installazione del sensore, alla geometria della strada e al numero di zone da rilevare (decrese all'aumentare del numero di zone da rilevare per ogni telecamera). Inoltre, le prestazioni delle telecamere risultano essere influenzate anche da altri fattori quali gli angoli di visuale verticale e laterale, il numero di corsie monitorate, la stabilità rispetto al vento e alle vibrazioni e la qualità dell'immagine.

Nel corso del tempo sono stati realizzati numerosi studi (Micchalopoulos P. G., 1991; Chatziioanou A. et al, 1994; Condos, F., 1996; Wang G. et al., 2008) in cui si sono state proposte svariate metodologie di analisi ed interpretazione di immagini video acquisite da telecamere posizionate in prossimità della sede stradale. I metodi di tracciamento dei veicoli basati sull'analisi di video possono essere classificati sia in funzione dell'estensione del dominio spaziale di riferimento che in funzione degli algoritmi utilizzati per realizzare il tracciamento dei veicoli. Nel primo caso, ossia in funzione dell'estensione del dominio spaziale di riferimento, è possibile suddividerli in due categorie:

- i sistemi di trattamento di zone limitate dell'immagine, detti anche *tripwire systems*, dove l'algoritmo tratta una o più piccole porzioni dell'immagine processando così un numero limitato di pixel. Nello specifico, le aree trattate possono essere costituite o da un insieme di linee (per esempio le linee dell'immagine che sono parallele



all'asse di ciascuna corsia stradale inquadrata) oppure da finestre rettangolari definite, le quali possono essere considerate delle spire induttive virtuali disposte non sulla pavimentazione stradale ma sulla sua immagine visualizzata.

- i sistemi di trattamento dell'intera immagine utile, detti anche *tracking systems*, in cui l'algoritmo tratta la totalità dell'immagine o, quantomeno, la parte dell'immagine relativa al solo tronco stradale visualizzato. Questi sistemi rilevano con elevata accuratezza tutti i veicoli che si trovano su un fotogramma, sono in grado di seguirli in quelli successivi e, oltre a fornire i parametri fondamentali del traffico (portata, velocità, tasso di occupazione, densità), consentono anche di ottenere altre ulteriori quali, ad esempio seguire la traiettoria dei veicoli, rilevare una situazione anomala del deflusso veicolare (veicolo fermo o incidente) e classificare i veicoli secondo le loro dimensioni.

I metodi di video-analisi sviluppati in letteratura possono essere anche classificati in sei categorie, in funzione degli algoritmi utilizzati per realizzare il tracciamento dei veicoli (Guido et al., 2014): i metodi model-based, i metodi region-based, i metodi active contour-based, i metodi feature-based, il metodo di tracciamento dei campi aleatori di Markov ed i metodi basati sui colori ed i modelli. La quasi totalità di tali consente di effettuare il tracciamento dei veicoli nel tempo attraverso delle operazioni preliminari quali l'estrazione dell'immagine di sfondo e l'identificazione e la rimozione delle ombre degli stessi veicoli.

I metodi model-based, originariamente sviluppati per il riconoscimento di veicoli in un unico fotogramma, possono essere usati anche per rilevare la posizione dei veicoli in una sequenza di immagini. Tali metodi, in cui la posizione dei veicoli viene sostanzialmente ricavata a partire dalla conoscenza della posizione della telecamera e da una stima dei possibili spostamenti nel tempo, forniscono risultati accurati per bassi volumi di traffico o per specifici tipi di oggetti inseguiti, quali ad esempio i modelli di veicoli riportati in figura 12.

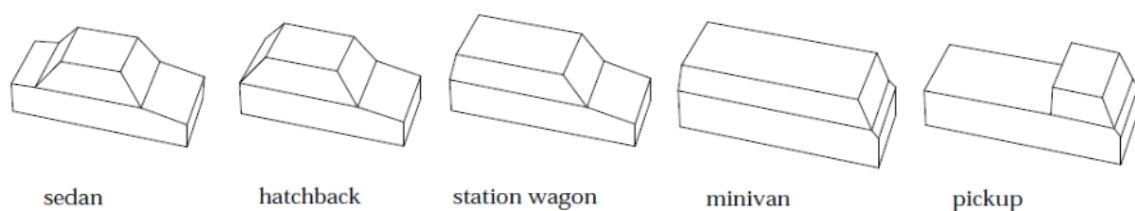


Figura 12 - Esempi di cinque diversi tipi di veicoli identificabili dai metodi model-based (Koler et al., 1993).

I metodi region-based consentono di individuare i veicoli a partire dall'analisi di un gruppo di pixel di forma generalmente circolare e, successivamente, di tracciarli nel tempo utilizzando delle analisi di correlazione differenziale. Questa tipologia di metodi fornisce risultati abbastanza accurati per elevati flussi di traffico anche se possono essere condizionati dai problemi di individuazione del veicolo in quanto diversi veicoli possono essere assegnati alla stessa regione di contorno. La figura 13 riporta il diagramma a blocchi del metodo di identificazione e tracciamento dei veicoli proposto da Zhang et al. nel 2007 finalizzato alla classificazione dei veicoli in base alla loro lunghezza.

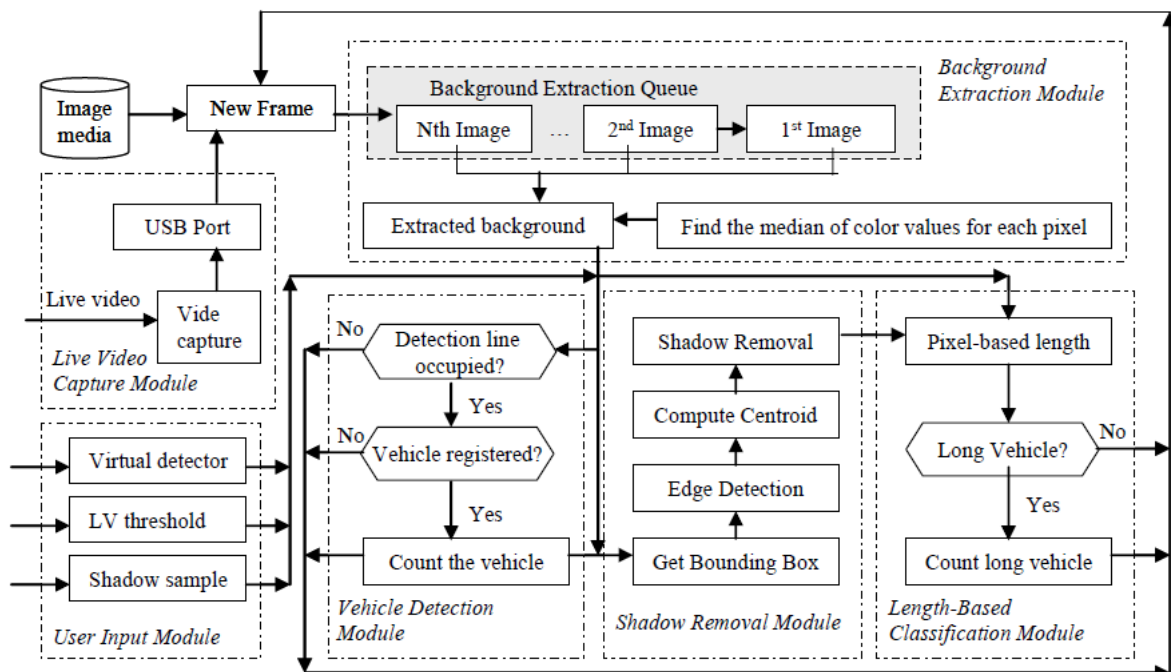


Figura 13 - Diagramma a blocchi del metodo di identificazione e tracciamento dei veicoli proposto da Zhang et al. nel 2007

I metodi active contour-based utilizzano modelli di contorno per il tracciamento dei veicoli in cui gli oggetti vengono identificati attraverso la modifica o il filtraggio di informazioni di base. Anche questi metodi, come i precedenti, possono presentare dei problemi durante la fase di identificazione del veicolo in parte occlusi ma, l'accuratezza e l'affidabilità dei risultati di questa tipologia di tecnica di monitoraggio del traffico risulta essere maggiore soprattutto per quegli algoritmi. Ad esempio nel modello proposto da Koller et al. del 1994 il contorno dei veicoli viene considerato deformabile nel tempo proprio per tenere in considerazione il fenomeno relativo alla parziale occlusione dei veicoli dovuto al transito ravvicinato di due o più veicoli (figura 14).

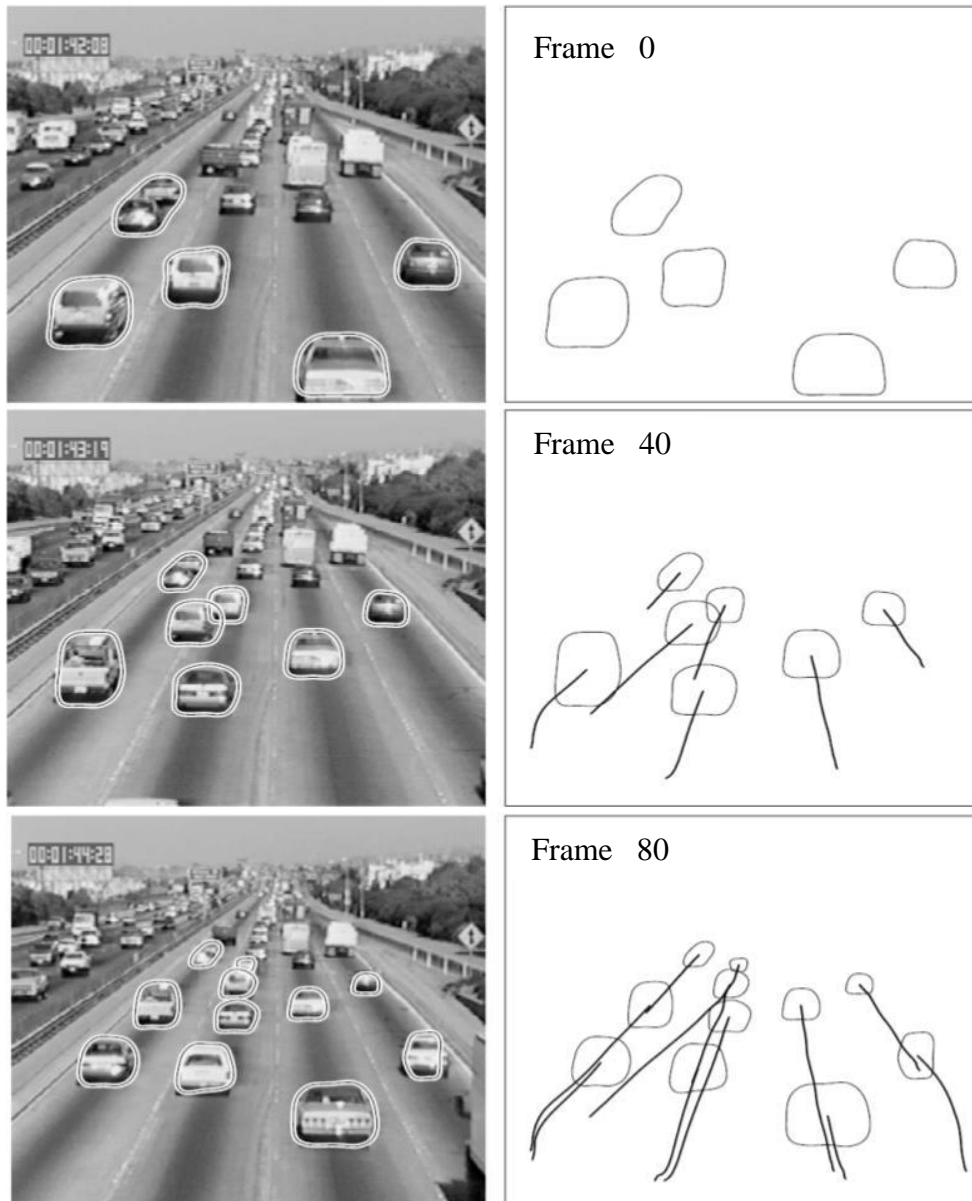


Figura 14 – Alcuni risultati ottenuti dall’algoritmo di rilevamento dei veicoli proposto da Koller et al. (1994): nella parte sinistra della figura sono riportati i frame 0, 40 e 80 della sequenza video analizzata mentre nella parte destra vengono riportati i contorni stimati dei veicoli e le loro traiettorie, partendo dal frame 0.

I metodi feature-based, effettuano il tracciamento dei veicoli seguendo nel tempo alcuni punti o linee in esso distinguibili, quali ad esempio la targa, la luci o il cruscotto. Secondo questo approccio le tracce di ogni punto dovranno essere parallele tra loro e, pertanto, è possibile garantire un’accuratezza maggiore nell’identificazione dei veicoli anche in presenza di occlusione parziale o nel caso di scarsa illuminazione. La figura 15 riporta una porzione delle tracce individuate di tre veicoli in uno studio effettuato da Coifman et al. nel 1998.



Figura 15 – Tracce delle feature individuate di tre veicoli individuati da Coifman et al. (1998).

Il metodo di tracciamento dei campi aleatori di Markov consiste nel segmentare le immagini in blocchi di pixel aventi geometria definita e correlare nel tempo i pixel di ciascun blocco tra loro in modo tale individuare nel fotogramma successivo lo stesso blocco di pixel. Nello specifico, gli algoritmi di questo tipo per prima cosa suddividono l'immagine di partenza in blocchi più piccoli e, per ciascuno di essi qualora vi sia presente un veicolo viene attribuita un'etichetta la quale viene poi ricercata nello stesso blocco dell'immagine successiva. In tal modo, è possibile tracciare il movimento dei veicoli nel tempo, anche nel caso in cui esso passa da un blocco ad un altro.

La figura che segue riporta a titolo esemplificativo alcuni veicoli tracciati in una sequenza di immagini analizzate in uno studio realizzato da Kamijo et al. nel 2001.

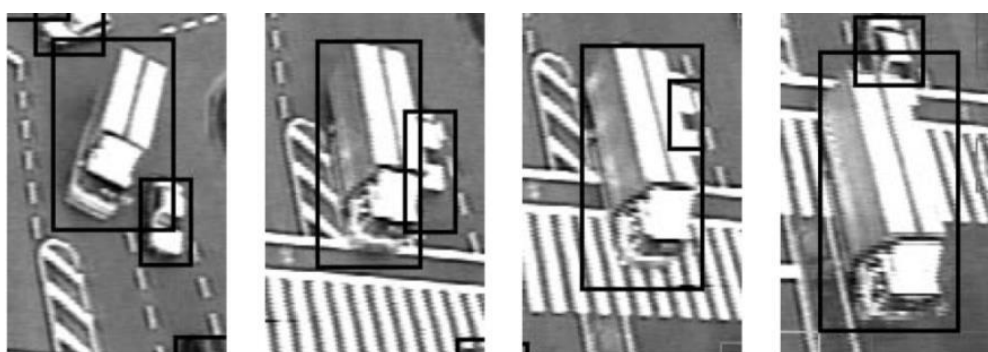


Figura 16 – Alcuni esempi di veicoli correttamente tracciati da Kamijo et al. in un loro studio effettuato nel 2001.

I metodi basati sui colori ed i modelli, infine, si basano sul tracciare nel tempo i veicoli attraverso la realizzazione di immagini classificate relative ai frame costituenti il video; tali sistemi consentono di rilevare più del 90% dei veicoli in transito anche in presenza di condizioni meteorologiche avverse o di ampie porzioni inombra. La figura seguente,

riporta alcuni esempi di veicoli individuati in maniera automatica dalla procedura messa a punto da Sun et al. nel 2002.



Figura 17 – Esempi di veicoli correttamente individuati in maniera automatica dalla procedura messa a punto da Sun et al. nel 2002.

#### 4.4 Il rilevamento con veicoli sonda

Un'ulteriore nuova tecnica per il monitoraggio del traffico sviluppata consiste nell'impiego di veicoli sonda, ossia dei veicoli dotati di dispositivi GPS (Global Position System) in grado di rilevare il posizionamento satellitare del veicolo. Tale tecnica di rilevamento, nota anche con l'acronimo inglese FCD (*Floating Car Data*), si presenta come un "sensore mobile" nel flusso veicolare in quanto non richiede alcun tipo di installazione lungo la sede stradale, risulta essere più economica rispetto alle altre tecniche di monitoraggio e richiede allo stesso tempo minori oneri per la manutenzione. Inoltre, fornisce il vantaggio di poter effettuare la copertura dell'intera rete stradale, consente di ottenere informazioni più affidabili sui viaggi in termini di lunghezza dei percorsi e tempi di percorrenza, permette di valutare i flussi origine-destinazione e, infine, dà la possibilità di rilevare automaticamente dei rallentamenti anomali della circolazione, quali quelli causati dagli incidenti. Di contro,

esistono limitazioni associate agli strumenti utilizzati in tale tecnica di monitoraggio, ossia l'accuratezza nella determinazione della posizione può essere anche molto scarsa come nel caso dei canyon urbani o nelle gallerie in cui la ricezione GPS viene interrotta. Inoltre, gli autisti che partecipano al piano di monitoraggio del traffico sono obbligati a rilevare la loro posizione geografica e, pertanto, ci possono essere anche dei problemi legati sia alla privacy di ognuno di loro che al fatto che il loro stile di guida possa risultare condizionato dalla consapevolezza di essere “controllati” durante la marcia.

Come accennato in precedenza, alla base di questa tecnica di monitoraggio vi è l'utilizzo di un ricevitore GPS posizionato nel veicolo sonda, la cui posizione geografica viene determinata attraverso il sistema di posizionamento satellitare purché siano visibili almeno quattro satelliti (figura 18).

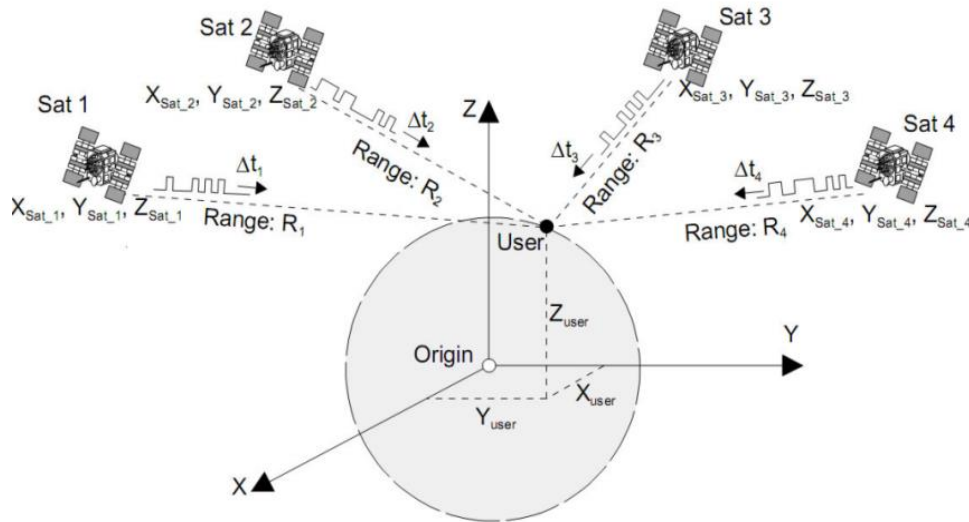


Figura 18 – Schematizzazione della modalità di determinazione delle coordinate del ricevitore GPS note le posizioni di quattro satelliti.

Nello specifico, le coordinate del ricevitore GPS ( $X_{User}$ ,  $Y_{User}$ ,  $Z_{User}$ ) sono ricavabili ponendo a sistema le quattro relazioni relative la distanza misurata (Range) tra ogni satellite e la posizione del dispositivo GPS (User):

$$R_i = \sqrt{(X_{Sat_i} - X_{User})^2 + (Y_{Sat_i} - Y_{User})^2 + (Z_{Sat_i} - Z_{User})^2} + c \cdot \Delta\tau_0 \quad (17)$$

dove  $X_{Sat_i}$ ,  $Y_{Sat_i}$  e  $Z_{Sat_i}$  sono le posizioni istantanee dei satelliti,  $c$  è la velocità della luce e  $\Delta\tau_0$  è l'errore di misura del tempo introdotto dall'orologio al quarzo del ricevitore GPS. La presenza di tale errore ( $\Delta\tau_0$ ), dovuto alla precisione del calcolo del tempo di volo dei

satelliti in orbita, causa degli errori nella determinazione della posizione del ricevitore GPS e gli elementi che influenzano maggiormente la precisione della misura sono la configurazione dei satelliti (altezza sull'orizzonte) e la loro visibilità. Inoltre, l'accuratezza nella determinazione della posizione è influenzata anche dal tipo di ricevitore GPS che, in funzione del segnale rilevato, può essere di tre tipologie:

- ricevitori per misure di codice, aventi una precisione tipica dell'ordine dei 5 metri;
- ricevitori a ricezione di fase a singola frequenza, con precisione metrica/sub-metrica;
- ricevitori a ricezione di fase a doppia frequenza, che possono raggiungere precisioni centimetriche dopo una correzione differenziale da effettuarsi tramite l'utilizzo di un secondo ricevitore GPS posizionato su postazione fissa la cui posizione sia nota.

Negli ultimi anni sono stati condotti diversi studi che hanno analizzato il comportamento del traffico sia urbano che autostradale attraverso l'utilizzo di diverse tipologie di veicoli sonda (pullman, taxi, ecc.) in cui, le informazioni provenienti dalla flotta di veicoli monitorati sono state gestite da un sistema centrale di elaborazione dei dati anche al fine di effettuare delle previsioni circa le condizioni di traffico nel breve termine. Per migliorare l'accuratezza del tracciamento dei veicoli sui singoli archi stradali alcune applicazioni utilizzano anche degli algoritmi di map matching, una tecnica di correzione delle misure di localizzazione dei sensori mediante mappe digitali, attraverso la quale la posizione GPS viene correlata con le coordinate della rete stradale comparando la traiettoria del veicolo con i percorsi presenti su una mappa digitale. I vari studi realizzati sono stati finalizzati principalmente alla stima ed alla previsione di alcune grandezze di interesse, quali ad esempio la velocità media, i tempi di viaggio e la matrice origine-destinazione (OD).

La stima e previsione della velocità è una delle informazioni più comunemente ricavate dall'elaborazione di informazioni provenienti dai veicoli sonda. In letteratura sono presenti numerosi studi in cui sono stati proposti degli algoritmi per la stima e la previsione della velocità media, come ad esempio quello proposto da Reinthaler et al. nel 2007 nell'ambito di un progetto di ricerca denominato "D-Motion" in cui sono stati utilizzati, oltre a taxi e mezzi di trasporto pubblico della città di Dusseldorf come veicoli sonda, anche dei rilevatori del passaggio dei mezzi pubblici utilizzati per la priorità alle intersezioni. In un altro studio, realizzato da Valenti e Mitrovich nel 2009, utilizzando la flotta FCD resa disponibile da una società privata che gestisce informazioni relative a posizione nel tempo e velocità di migliaia di auto private, è stata stimata la velocità media dei veicoli in transito sul grande raccordo anulare di Roma. Attraverso l'applicazione di due algoritmi,

rispettivamente basati su una Rete Neurale e su un Modello di corrispondenza, è stato possibile prevedere l'evoluzione delle velocità per brevi intervalli di tempo (15 - 30 min) a partire dai dati riferiti allo stato attuale e quelli del recente passato.

La stima e previsione dei tempi di viaggio tra il tempo di viaggio reale e quello ottenuto tramite diverse fonti di dati è stato oggetto di svariati studi. Ad esempio, nello studio effettuato da Wang et al. (2012), è stato definito di un modello di stima e previsione del tempo di viaggio lungo un corridoio in un tratto di autostrada della lunghezza di 88 km a Taiwan. In tale modello, sfruttando i sia i dati derivanti da alcuni veicoli sonda (una flotta di autobus) e da alcune spire posizionate lungo il tratto investigato, sono stati previsti i tempi di viaggio tramite un modello Nearest-Neighborhood che ricerca nella serie storica condizioni simili (velocità, flusso e tempo di viaggio) a quelle dello stato attuale per ipotizzare un medesimo sviluppo del sistema negli istanti successivi (figura 19).

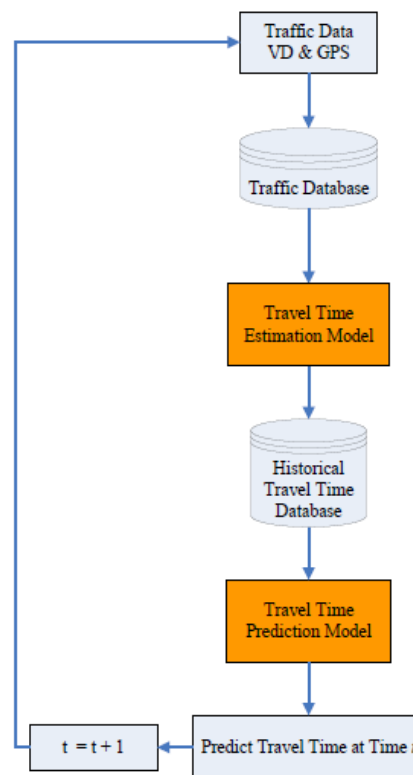


Figura 19– Flusso del modello proposto da Wang et al. (2012) per la stima e la previsione dei tempi di viaggio.

La matrice OD è una risorsa essenziale per i modelli di pianificazione dei trasporti, per l'attuazione di avanzati modelli di simulazione del traffico e per lo sviluppo di strategie di gestione e di controllo del traffico. In alcuni studi (Ásmundsdóttir et al., 2010; Zhao et al., 2010) sono state proposte delle metodologie di stima della matrice di domanda nel caso



dinamico utilizzando sia dati derivanti da una flotta di veicoli sonda che dati provenienti da sensori puntuali di tipo remoto. In tali tipologie di applicazione, oltre ad individuare i reali spostamenti effettuati dagli utenti, è possibile di cogliere la dinamicità del sistema nel tempo e, per quanto concerne la loro affidabilità, è possibile affermare che essa dipende essenzialmente dalla percentuale di veicoli sonda che partecipano al flusso di traffico: di norma bastano pochi veicoli sonda in condizioni di traffico congestionato mentre, ne occorrono di più, in condizioni di traffico scorrevole.

## **4.5 Il rilevamento attraverso informazioni reperibili sul WEB**

Negli ultimi anni, in concomitanza alla repentina diffusione dell'utilizzo del web sia attraverso l'utilizzo di pc che tramite dispositivi mobili (smartphone, tablet, ecc.) si sono realizzate una serie di applicazioni che, pur fornendo nella maggior parte dei dati dei valori aggregate o spesso di tipo qualitativo, possono essere utili per reperire delle informazioni, come ad esempio nel caso dei livelli di congestione del traffico. A seguire si riporta a titolo esemplificativo una breve descrizione di alcuni applicativi tra quelli reperibili in rete.

### **4.5.1 L'applicazione Traffico di Google Maps**

Questa applicazione, lanciata nel 2010 e più volte perfezionata nel tempo, rappresenta ad oggi l'applicazione web fruibile in modo completamente gratuito maggiormente utilizzata (<https://www.google.it/maps>) attraverso la quale è possibile controllare in tempo reale il livello di percorribilità di strade urbane ed importanti arterie extraurbane. In base al traffico e alla disponibilità di dati, i tratti stradali possono apparire evidenziati nei seguenti colori di segnalazione:

- verde: viabilità scorrevole in cui non ci sono ritardi dovuti al traffico;
- giallo: viabilità caratterizzata da un volume di traffico medio;
- rosso: viabilità lenta dove vi sono ritardi dovuti al traffico in cui la velocità di percorrenza della strada è tanto minore quanto maggiore l'estensione dell'area rossa;

- rosso scuro: viabilità molto lenta, con code a tratti e velocità di percorrenza molto modesta;
- area non colorata: in tal caso significa che il sistema non ha sufficienti dati per fornire delle accurate informazioni sulla viabilità.

Inoltre, durante la visualizzazione del traffico è possibile visualizzare anche i fattori che possono causare ritardi quali ad esempio la presenza di incidenti o lavori di manutenzione. Oltre alla situazione in tempo reale il servizio, realizzato da Google in collaborazione con aziende specializzate in questo tipo di rilevazioni, permette di “prevedere” quali saranno le condizioni del traffico in un particolare giorno della settimana e a una determinata ora anche grazie al degli utenti che, rigorosamente in forma anonima, possono decidere di contribuire alla raccolta dati di Google sulla mobilità attivando la funzione “la mia posizione” nei telefoni cellulari dotati di GPS.

Sui dispositivi Android la versione attuale dell’applicazione avvisa sulle condizioni del traffico in tempo reale e, pertanto, è possibile scegliere l’itinerario più rapido o comunque più agevole per giungere a destinazione, sia prima di partire che durante il viaggio. Le figure seguenti, riportano a titolo esemplificativo due screenshot della versione desktop dell’opzione Traffico di Google Maps in tempo reale o di traffico tipico relativi sia contesti urbani che aree extraurbane.

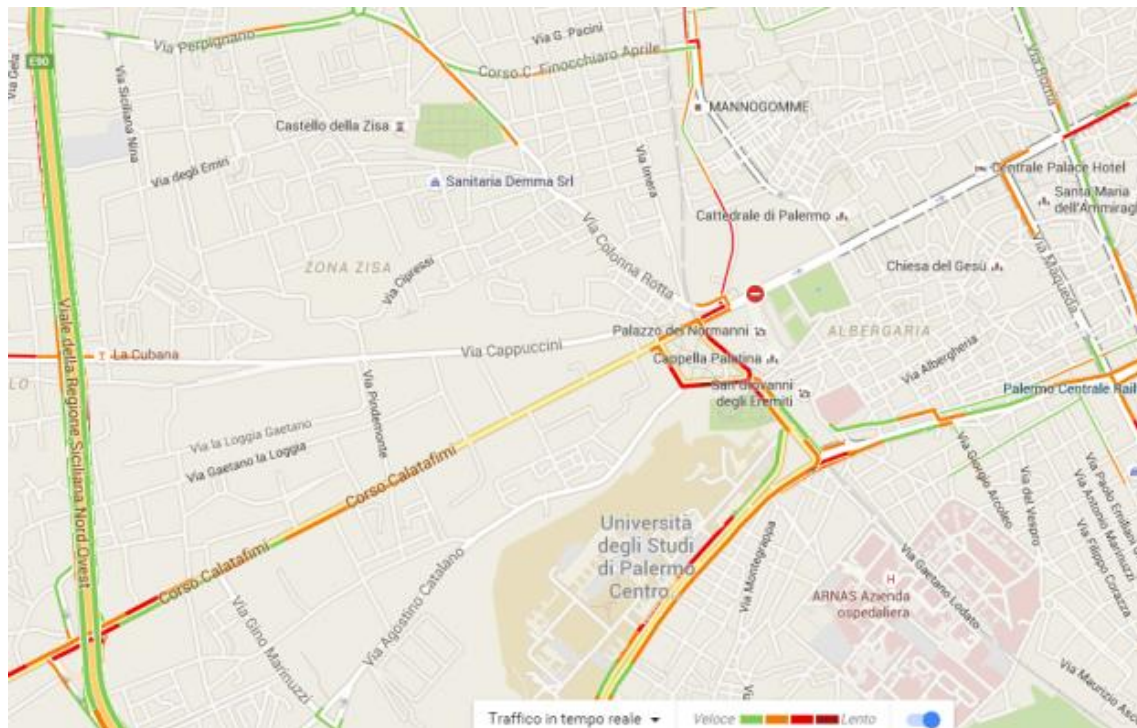


Figura 20 – Condizioni del traffico in tempo reale di una porzione del centro urbano di Palermo acquisita alle ore 15:00 di un giorno feriale medio.

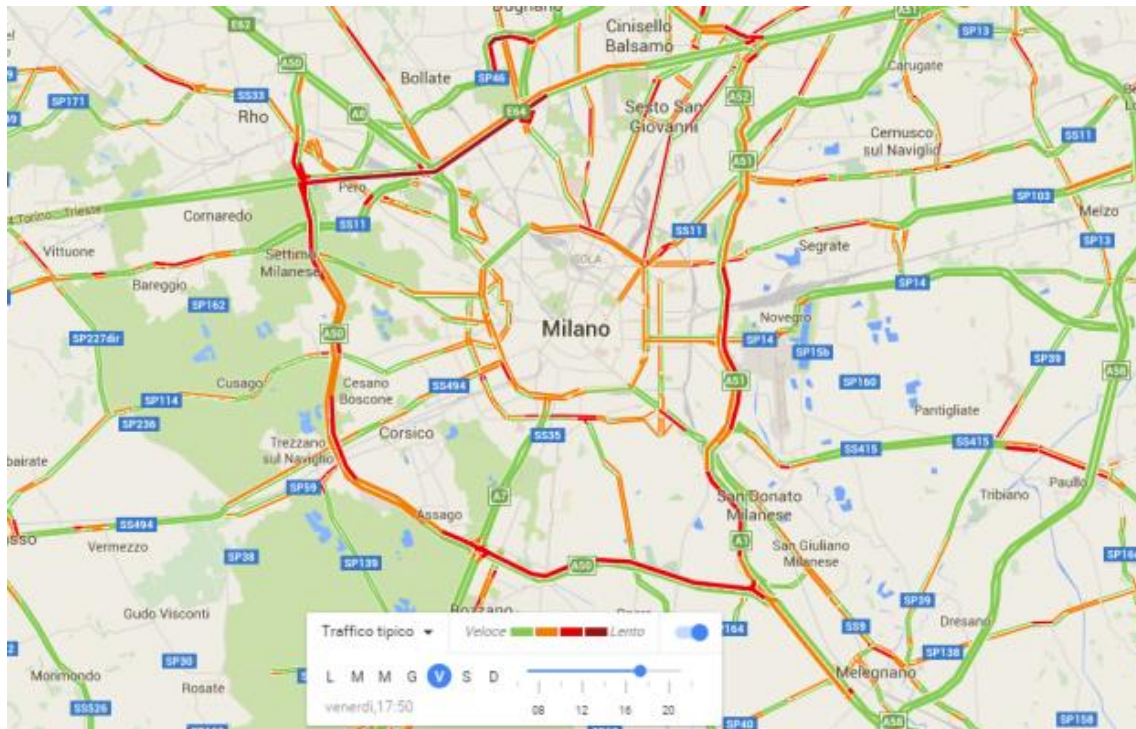


Figura 21 – Condizioni del traffico tipico dell’hinterland della città di Milano relativa il venerdì pomeriggio, intorno alle ore 18:00

#### 4.5.2 L’applicazione Infoblu Traffic

L’applicazione Infoblu Traffic (<http://www.infoblutraffic.it/>), sviluppata dalla società OCTOTelematics e disponibile sia per dispositivi mobili che fissi, effettua una rilevazione del traffico su larga scala mediante l’utilizzo congiunto di informazioni provenienti da una rete di differenti strumentazioni (telecamere, sensori di traffico, varchi telepass e centraline meteo) e dai contatori satellitari dei propri clienti che nell'assoluto rispetto della privacy forniscono la posizione del loro veicolo nel tempo. In tal modo l’applicazione è in grado di fornire in tempo reale la situazione del traffico stradale, in visualizzazione lineare e su mappa (figura 22), con segnalazione di rallentamenti dovuti a cantieri, condizioni meteo o incidenti, su tutte le autostrade, le principali strade italiane e le aree metropolitane. L’applicativo indica anche la presenza di autovelox fissi e sistemi tutor. Per ogni tratto stradale è visibile una colorazione che indica la velocità media di scorrimento rilevata in tempo reale attraverso i sensori mobili di Infoblu. La colorazione assume i seguenti significati:

- Nero: bloccato, fino a 10 km/h;
- Rosso: congestionato, da 10 a 30 km/h;

- Arancione: rallentato, da 30 a 50 km/h;
- Giallo: intenso, da 50 a 70 km/h;
- Azzurro: regolare, da 70 a 90 km/h;
- Verde: scorrevole, oltre 90 km/h;
- Grigio: dati non disponibili.

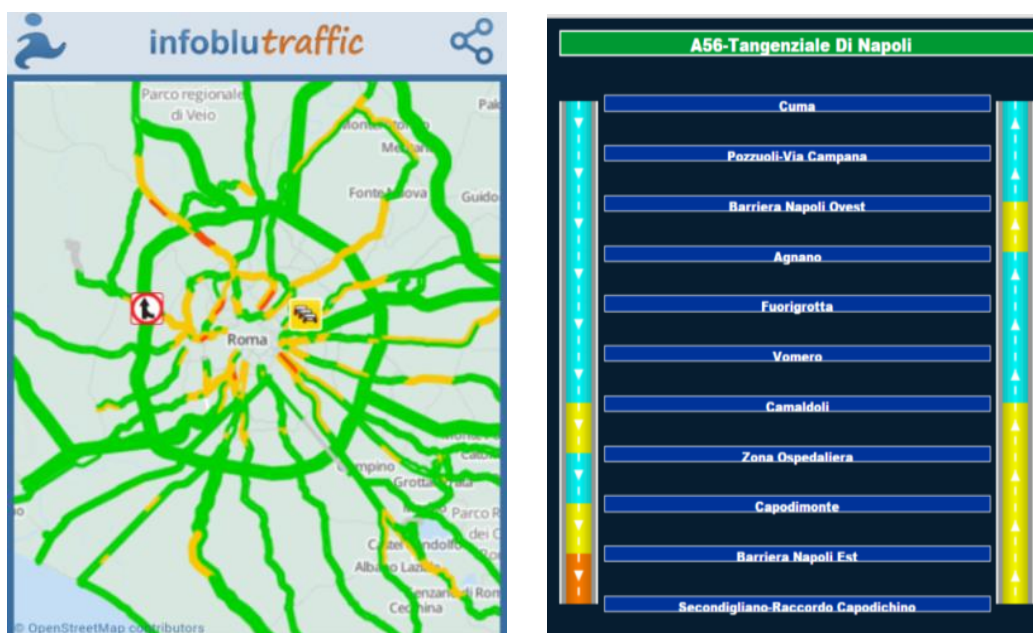


Figura 22 – Condizioni del traffico in tempo reale acquisite alle ore 16:00 di un giorno feriale medio dell’hinterland della città di Roma (parte sinistra) e lungo la tangenziale di Napoli (parte destra).

L’applicazione, oltre a fornire in tempo reale ed a titolo gratuito la condizione del traffico stradale su tutte le autostrade e le principali strade extraurbane, prevede anche la possibilità di acquistare una versione a pagamento per alcune aree metropolitane nelle quali è possibile accedere alle informazioni circa i livelli di congestione del traffico relativo la rete urbana.

#### 4.5.3 L’applicazione social Waze

Waze è un applicativo di tipo social gratuito (<https://www.waze.com/it/>) attraverso la quale gli utenti registrati alla community possono condividere informazioni in tempo reale sul traffico e le condizioni stradali. I singoli utenti, dopo aver effettuato il login, sono in grado di generare informazioni sul traffico e sulle condizioni stradali in tempo reale; inoltre,

possono segnalare incidenti, pericoli, posti di blocco e altri eventi che gli stessi incontrano lungo la strada. Ulteriori funzioni dell'applicativo sono il calcolo degli itinerari basati sulle informazioni relative le condizioni stradali generate in tempo reale, la navigazione con istruzioni vocali complete, il ricalcolo automatico dell'itinerario a seconda di come variano le condizioni stradali e la possibilità di trovare i distributori di carburante più economici. La figura seguente riporta una schermata di Waze relativa una porzione del GRA di Roma in prossimità dell'uscita per l'aeroporto di Fiumicino in cui vengono indicate la posizione degli utenti e le altre informazioni da loro condivise (es: presenza di un ingorgo).

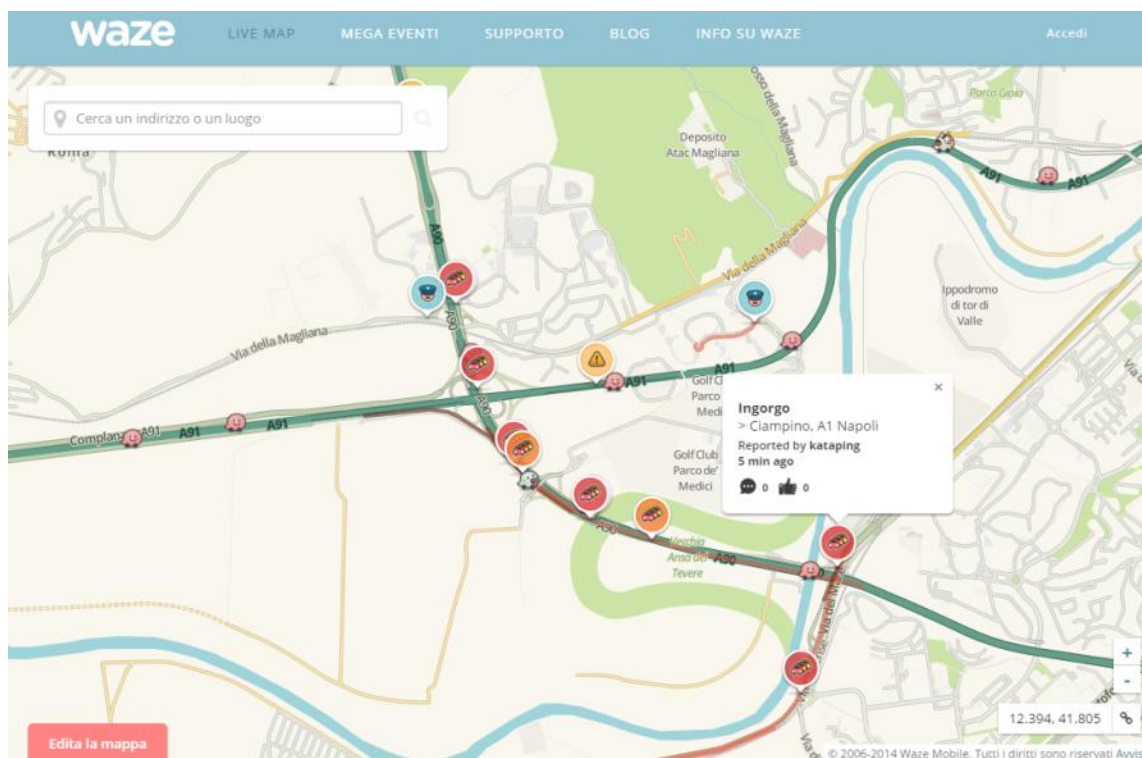


Figura 23 – Schermata di Waze relativa una porzione del GRA di Roma in prossimità dell'uscita per l'aeroporto di Fiumicino in cui vengono indicate la posizione degli utenti e le altre informazioni da loro condivise.

#### 4.6 Riferimenti bibliografici

Ásmundsdóttir, R., Chen, Y. and Zuylen, H. J. (2010). *Dynamic origin-destination matrix estimation using probe vehicle data as a priori information*. Traffic Data Collection and its Standardization, 89-108.

- Chatziioanou, A., Hockaday, S., Ponce, L., Kaighn, S. and Staley, C., (1994). *Video Image Processing Systems Applications*. Transportation, Phase II. Final Report, California Polytechnic State Univ., San Luis Obispo, CA.
- Coifman B., Beymerb,D., McLauchlan P.and Malik J. (1998). *A real-time computer vision system for vehicle tracking and traffic surveillance*. Transportation Research Part C 6, pp.271-288
- Condos, F., (1996). *Traffic surveillance and detection systems for intelligent transportation systems applications*. Proceedings of the 1996 ITE Annual Conference, Minneapolis, MN, pp. 354-356
- Guido G., Vitale A., Saccomanno F.F., Astarita V. and Giofrè V., (2014). *Vehicle tracking system based on videotaping data*. Procedia - Social and Behavioral Sciences 111, 2014, pp. 1123 – 1132.
- Hickman, M. D. and Mirchandani, P. B., (2008). *Airborne Traffic Flow Data and Traffic Management*. Symposium on the Fundamental Diagram: 75 Years (Greenshields 75 Sym-posium), July 8-10, 2008, Woods Hole, MA, USA.
- Hinz, S., (2003). *Detection and counting of cars in aerial images*. International Conference on Image Processing (ICIP), Barcelona, Spain, Vol. 3 (III), pp. 997-1000.
- Kamijo S., Ikeuchi K. and Sakauchi M., (2001). *Vehicle tracking in low-angle and front-view images based on spatiotemporal Markov random field model*, Proc. 8th World Congr. Intell. Transp. Syst.
- Koler D., Daniilidis K. and Nagelyz H., (1993). *Model-based object tracking in monocular image sequences of road traffic scenes*. International Journal of Computer Vision, 10:3, pp 257–281.
- Koller D., Weber J., and Malik J., (1994). *Robust multiple car tracking with occlusion reasoning*. Proc. Eur. Conf. Computer Vision, vol. 1, pp. 189–196.
- Kozempel, K. and Reulke, R., (2009). *Fast Vehicle Detection and Tracking in Aerial*. Proc. of CMRT09, vol. XXXVIII, no. 3/W4, 2009, pp. 175-180.
- Lenhart, D., Hinz, S., Leitloff, J. and Stilla, U., (2008). *Automatic traffic monitoring based on aerial image sequences*. Pattern Recognition and Image Analysis 18(3), pp. 400–405.

- Micchalopoulos P G, (1991). *Vehicle Detection Through Video Image Processing AUTOSCOPE System* [J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 40 (1):21-29
- Reinthaler, M., Nowotny, B., Weichenmeier and F., Hildebrandt, R., (2007). *Evaluation of speed estimation by floating car data within the research project Dmotion*. 14th World Congress on Intelligent Transport Systems, Beijing, China.
- Sun Z., Bebis G. and Miller R., (2002). *Improving the Performance of On-Road Vehicle Detection by Combining Gabor and Wavelet Features*, Proc. IEEE Fifth Int'l Conf. Intelligent Transportation Systems
- Tuermer S., Leitloff J., Reinartz P., and Stilla U., (2010). *Automatic vehicle detection in aerial image sequences of urban areas using 3D HoG features*. ISPRS Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis, page B:50, Paris, France.
- Valenti G., Mitrovich S. (2009). *Tecnologie ITS per i Sistemi di Trasporto*. Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) [http://old.enea.it/produzione\\_scientifica/pdf\\_brief/Valenti\\_ITStrasporti.pdf](http://old.enea.it/produzione_scientifica/pdf_brief/Valenti_ITStrasporti.pdf)
- Wang J.Y., Wong K. I. and Chen Y.Y. (2012). *Short-term travel time estimation and prediction for long freeway corridor using NN and regression*. 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, pp. 582-587.
- Wang G., Xiao D. and Gu J., (2008). *Review on vehicle detection based on video for traffic surveillance*, Proc. IEEE ICAL, pp. 2961–2966.
- Zhao H., Yu L., Guo J., Zhao N., Wen H. and Zhu L. (2010). *Estimation of Time-Varying OD Demands Incorporating FCD and RTMS Data*. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 10(1), pp 72-80.
- Zhang, G., Avery, R.P. and Wang, Y., (2007). *Video-based vehicle detection and classification system for real-time traffic data collection using uncalibrated video cameras*. Transport. Res. Board: J. Transport. Res. Board 1993, 138–147.

## CAPITOLO 5

### L'impiego dei SAPR per il monitoraggio del traffico

#### 5.1 Introduzione

I Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR) sono aeromobili caratterizzati dall'assenza di un equipaggio a bordo nei quali il volo è governato da un pilota che da terra gestisce uno specifico sistema di controllo. Vengono anche chiamati droni, italianizzando il termine "drone" che in inglese vuol dire "rimbombo, ronzio", per via del rumore prodotto. I SAPR sono noti anche attraverso altri acronimi, molti dei quali di derivazione anglosassone, come ad esempio RPA (Remotely Piloted Aircraft), UAV (Unmanned Aerial Vehicle), RPV (Remotely Piloted Vehicle), ecc..

Da alcuni decenni sono utilizzati per applicazioni militari in quanto vengono generalmente impiegati per svolgere missioni definite "Dull, Dirty and Dangerous", ossia "noiose, sporche e pericolose" ma, negli ultimi anni, hanno trovato sempre più spesso delle applicazioni in campo civile in cui, spesso, sono caratterizzati dall'aver costi operativi e di gestione minori rispetto ad altre tipologie di strumentazioni.

Nella rimanente parte del capitolo, dopo una breve descrizione sulla loro origine ed evoluzione nel tempo, vengono descritte le principali caratteristiche, le peculiarità dei droni impiegati in ambito civile e gli aspetti legislativi che disciplinano il loro utilizzo. Successivamente, vengono brevemente descritti i principali campi applicativi nell'ambito dell'ingegneria e quelli relativi alle problematiche dei trasporti.



## 5.2 I Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR)

Scopo del presente paragrafo è quello di introdurre i Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto utilizzati in ambito civile. Attraverso l'impiego di un drone equipaggiato con un specifico sensore in grado di acquisire delle informazioni (fotografie, riprese video, immagini all'infrarosso, ecc.) è possibile ottenere delle utili informazioni, difficilmente reperibili in altro modo o in ogni caso sostenendo maggiori costi ed impiegando più tempo, necessarie per la realizzazione di una specifica attività. Nei sotto-paragrafi seguenti, dopo dei brevi cenni storici relativi la loro nascita ed evoluzione nel tempo, viene presentata una loro classificazione, vengono descritte le due principali tipologie di SAPR utilizzati in ambito civile, vengono analizzati i loro principali componenti elettronici ed, infine, sono riportate le principali norme che ne regolano l'utilizzo.

### 5.2.1 Cenni storici

La nascita dei mezzi remotamente controllati può essere ricondotta agli albori dell'aviazione stessa e il primo utilizzo di un oggetto volante senza un pilota a bordo risale al 1849 quando l'esercito Austro-Ungarico impiegò, seppur con poco successo, dei palloni aerostatici durante l'assedio alla città di Venezia. Successivi prototipi di velivoli senza pilota a bordo furono utilizzati durante il primo conflitto mondiale, quali ad esempio l'Aerial Target (AT), costruito dalla Royal Aircraft Factory della Gran Bretagna nel 1916 (figura 24, parte sinistra) utilizzato sia per difesa che come bomba volante, e l'aeroplano automatico Sperry Aerial Torpedo, realizzato dalla US Navy degli Stati Uniti d'America nel 1918 (figura 24, parte destra) in cui una serie di giroscopi montati internamente permetteva al velivolo di volare senza bisogno di intervento umano.

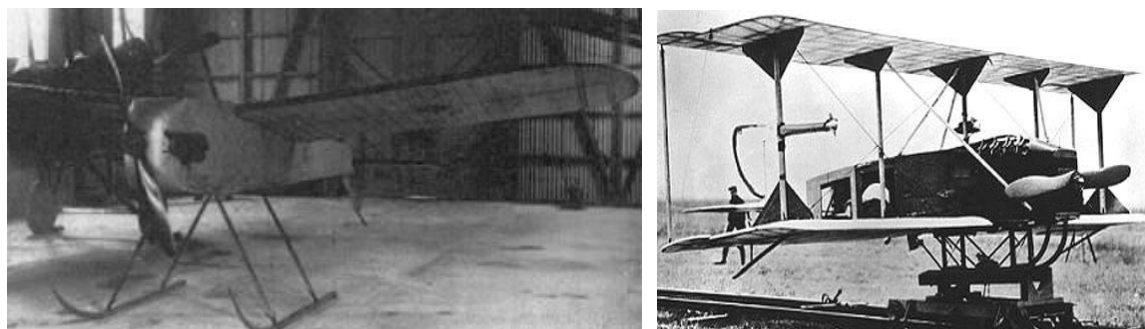


Figura 24 – Primi esempi di velivoli senza pilota a bordo realizzati tra il 1916 ed il 1918: nella parte sinistra l'Aerial Target britannico, a destra lo Sperry Aerial Torpedo statunitense.

Nei decenni seguenti lo sviluppo tecnologico permise alle varie aziende e alle truppe militari di portare avanti progetti che portarono alla conversione di alcuni modelli di aerei in APR e alla nascita dei primi sistemi senza pilota che potevano essere lanciati dalle navi da guerra e controllati mediante un autopilota. Si stima che nel corso della Seconda Guerra Mondiale l'esercito americano potesse disporre di circa 15.000 aerei radio controllati. Successivamente, sia durante la Guerra Fredda che nella guerra del Vietnam, lo sviluppo tecnologico permise di raggiungere un elevato livello qualitativo, portando sul mercato soluzioni sempre più piccole e con caratteristiche tali da poter essere impiegati in innumerevoli scenari operativi (figura 25).



Figura 25 – Drone statunitense AQM-34 (parte sinistra) utilizzato durante la guerra del Vietnam installato su un aereo C-130 (parte destra)

Nei decenni successivi la ricerca tecnologica militare ha permesso la creazione di modelli sempre più sofisticati e, pertanto, i droni da “semplici” bombe teleguidate sono diventati delle vere piattaforme aeree remote dotate di sensori in grado di sorvegliare il territorio. Al giorno d’oggi, vengono utilizzati da decine di paesi per ragioni di sicurezza nazionale e per condurre operazioni militari antiterrorismo; anche l’Italia, tra il 2001 e il 2008, si è dotata di una flotta di dodici aerei teleguidati: sei Predator (figura 26, parte sinistra) utilizzati per la ricognizione con visori all’infrarosso e radar e sei Reaper (figura 26, parte destra) utilizzabili per operazioni belliche.



Figura 26 – Moderni velivoli teleguidati utilizzati per scopi militari sia durante le ricognizioni che nelle operazioni belliche: a sinistra il ricognitore Predator, a destra il bombardiere Reaper.

A seguito del rapido progresso tecnologico registrato nel corso degli anni duemila che ha consentito una miniaturizzazione dei componenti elettronici gli APR hanno cominciato a diffondersi anche in ambito civile, sia per scopi professionali che ricreativi.

### 5.2.2 Classificazione dei SAPR

Nel corso degli anni sono state effettuate diverse classificazione dei SAPR in funzione di alcune loro caratteristiche quali ad esempio la loro spinta propulsiva, la loro dimensione o la loro performance (autonomia e range di operatività). Dal punto di vista della generazione della spinta propulsiva, escludendo i droni ad ala battente che si ispirano agli insetti ed agli uccelli (figura 27), si possono individuare due classi di UAV:

- ad asse orizzontale, che sono ispirati ai comuni aerei e che consentono di raggiungere elevate velocità di crociera e di conseguenza un rapporto particolarmente favorevole tra superficie alare e peso complessivo del velivolo;
- ad asse verticale, come negli elicotteri, in cui è possibile realizzare manovre di atterraggio e decollo in verticale (in inglese sono chiamati con l'acronimo VTOL, "Vertical Take-Off and Landing) e di effettuare l'hovering, ossia realizzare un volo a velocità nulla stazionando in un punto fisso.



Figura 27 – Esempi di due droni ad ala battente: a sinistra uno simile ad un insetto, a destra uno simile ad un uccello (Negrello, 2012).

La classificazione fatta dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti distingue i droni in cinque sottoclassi in funzione della loro dimensione. La tabella seguente riportata tale classificazione in cui, per ciascuna delle cinque categorie individuate, si dettagliano il peso

massimo al decollo (espresso in libbre), l'altitudine operativa (in piedi) e la massima velocità del vento (in nodi).

Categoria	Dimensione	Peso massimo al decollo [libbre]	Altitudine operativa [piedi]	Velocità del vento [nodi]
Gruppo 1	Micro	0-20	<1,200	<100
Gruppo 2	Mini	21-55	<3,500	<250
Gruppo 3	Piccoli	<1320	<18,000	<250
Gruppo 4	Medi	>1320	<18,000	Qualunque velocità
Gruppo 5	Grandi	>1320	>18,000	Qualunque velocità

Tabella 2 - Classificazione degli UAV secondo l'U.S. Department of Defense

### 5.2.3 Multi-rotori e droni ad ala fissa

I droni destinati agli usi di tipo civile sono generalmente quelli a propulsione elettrica appartenenti alle classi micro e mini ossia aventi una massa complessiva modesta (peso complessivo al decollo inferiore di 30 kg), una modesta autonomia di volo (massimo un paio di ore) ed un raggio limitato di operatività (solitamente sono pilotati a vista). Sono in grado di eseguire automaticamente un piano di volo, consentono la trasmissione in tempo reali delle informazione relative i dati telemetrici e, laddove risultano essere dotati di un sensore visivo, anche della scena da esso inquadrata. Possono avere sia un sistema di propulsione ad asse verticale che di tipo orizzontale: quelli appartenenti alla prima tipologia sono comunemente chiamati “ad ala rotante” mentre gli altri sono conosciuti anche con il termine di “ala fissa”. La principale differenza tra le due tipologie di droni consiste nel sistema propulsivo: nel caso del multi-rotore la direzione di avanzamento coincide con quella della forza di sostentamento, generata dalle eliche, che deve equilibrare il peso del drone (figura 28, parte sinistra); mentre nel caso dell'ala fissa la direzione di avanzamento, data dalla spinta dell'unica elica, è perpendicolare alla forza di sostentamento (figura 28, parte destra). Tale forza di sostentamento intesa come equilibratrice del peso, è definita nelle scienze aeronautiche come “portanza”.

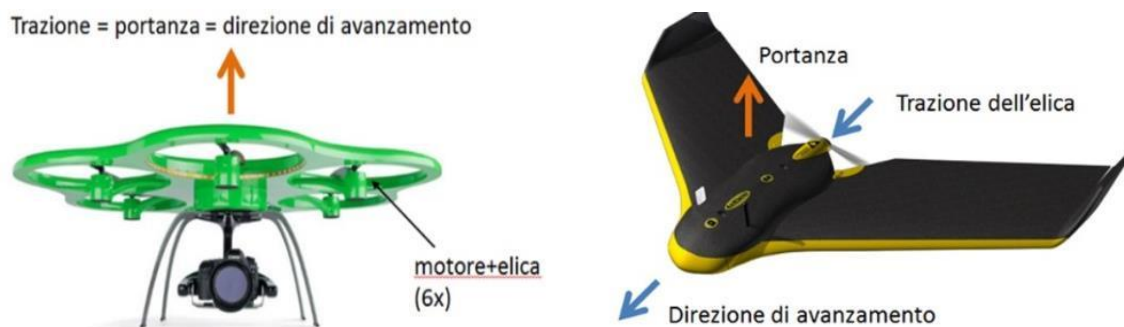


Figura 28 – Rappresentazione dell'aerodinamica dei due tipi di drone: multi-rotore (sinistra) ed ala fissa (destra).

La tabella successiva riassume le principali differenze che intercorrono, a livello funzionale e operativo, fra le due tipologie di droni sopra elencate.

Multi-rotore	Ala fissa
Il comportamento aerodinamico è simile a quello di un elicottero	Il comportamento aerodinamico è simile a quello di un aereo
Le eliche sono portanti, ovvero agiscono nella direzione del peso del drone	L'elica è spingente e serve a fornire spinta al drone nella direzione di avanzamento, e portanza all'ala per bilanciarne il peso
Possiedono capacità di <i>hovering</i> (stazionamento a mezz'aria)	Non hanno possibilità di stazionare in volo
I movimenti sono eseguiti controllando opportunamente il numero di giri delle singole eliche	I movimenti sono eseguiti tramite le superfici aerodinamiche mobili (es. alettoni)
Possono ricoprire con il sorvolo aree relativamente ristrette, ma con grande qualità di ripresa (video o fotografica)	Sono in grado di sorvolare aree molto estese (decine di ettari in un volo di mezz'ora)

Tabella 3 – Caratteristiche differenti delle due principali tipologie di APR utilizzati a livello professionale

I multi-rotori sono dotati di una centralina dedicata per il controllo del volo e, rispetto agli elicotteri, presentano molteplici vantaggi operativi come la capacità di operare in spazi ristretti, la possibilità di eseguire decollare ed atterrare in verticale e quella di fare volo traslato in tutte le direzioni mantenendo un orientamento qualsiasi. Il loro principio di funzionamento si basa esclusivamente sulla velocità di rotazione dei gruppi elica/motore, le uniche parti meccaniche in movimento. Per quanto concerne la loro autonomia di volo essa è funzione della configurazioni e del carico trasportato (payload), in ogni caso comprese le operazioni di decollo e di atterraggio il tempo di volo non è di norma

superiore a 15-20 minuti; mentre, la loro velocità operativa è molto bassa (generalmente 2-5 m/s). I droni appartenenti a questa tipologia possono presentarsi in differenti configurazioni in funzione del numero di bracci e/o motori utilizzati: le più comuni sono i quadricotteri (con quattro o con otto motori) e gli esacotteri (con sei motori). Il frame, ossia la struttura principale dove vengono fissati i motori e l'elettronica, è generalmente realizzato in materiale leggero e resistente (plastica, materiali compositi, carbonio, ecc.) e vi si possono riconoscere i seguenti componenti fondamentali:

- un corpo centrale, atto ad ospitare tutte le elettroniche (di volo, di comando, telemetria, segnale video, ecc.)
- i bracci porta motori alla cui estremità vi sono i supporti per i motori;
- i supporti per i motori, ai quali sono a loro volta connesse le eliche;
- il supporto (o i supporti) per la batteria che fornisce l'alimentazione;
- il carrello di atterraggio che non sempre è incluso nei frame e che può essere di vario tipo (ad esempio fisso o retrattile);
- l'alloggiamento per il payload.



Figura 29 – Elementi principali costituenti il frame di un drone ad ala rotante

I movimenti attuabili da un multi-rotore sono realizzati agendo, in modalità manuale o automatica, su quattro gradi di libertà: rollio (roll), beccheggio (pitch) e imbardata (yaw), e “gas” (throttle), ovvero la spinta delle eliche. I primi tre sono di fatto gli angoli percorsi dal drone attorno a quelli che sono definiti i suoi assi corpo: il rollio avviene attorno all’asse corpo X, diretto verso la prua del drone; il beccheggio avviene attorno all’asse Y, che punta alla sinistra del drone; l’imbardata avviene attorno all’asse Z, l’asse verticale del drone (Figura 30).

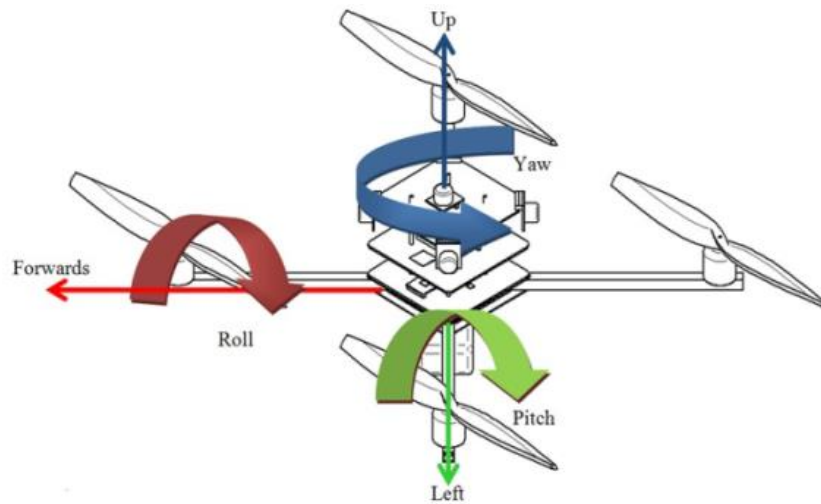


Figura 30 – Movimenti angolari eseguibili dal multi-rotore .

I droni ad ala fissa, simili invece agli aeroplani, sono caratterizzati da una struttura principale estremamente leggera realizzata in polistirolo o in altri materiali aventi caratteristiche analoghe e da un sistema di propulsione ad asse orizzontale generalmente costituito da un'unica elica rotante. Il decollo viene generalmente effettuato o tramite un meccanismo di lancio oppure vengono direttamente lanciati dall'operatore; l'atterraggio, invece, viene effettuato scendendo progressivamente di quota in linea retta o seguendo una rotta circolare e, successivamente, spegnendo i motori in modo tale che il drone si poggia a terra in una porzione di territorio in cui non siano presenti ostacoli che possano frenare bruscamente la sua corsa.

Nella figura 31 è mostrato un drone ala fissa nella cui struttura si possono riconoscere:

- la struttura principale, ossia le due semi-ali simmetriche e la fusoliera;
- l'elica propulsiva;
- gli alloggiamenti per l'elettronica e la batteria, ricavati all'interno del corpo in polistirolo;
- l'alloggiamento per il payload, posizionato nella fusoliera ;
- gli alettoni, ossia le superfici aerodinamiche mobili che consentono di realizzare i movimenti.

Tali tipologie di SAPR sono utilizzati prevalentemente per scopi cartografici in quanto, essendo caratterizzati una velocità di crociera più alta (da 30 a 60 km/h) ed una maggiore autonomia di volo (mediamente 30 - 45 minuti), riescono ad investigare maggiori superfici di territorio in minor tempo. Di contro i loro payload, posizionati nella parte anteriore della struttura oppure nella parte centrale della stessa e rivolti

verso il basso, sono generalmente modesti (poche centinaia di grammi) e solidali alla struttura.

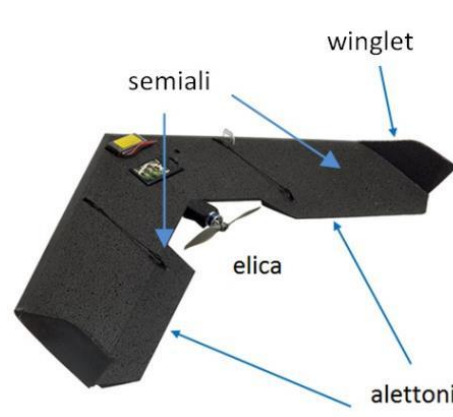


Figura 31 – Esempio di struttura di drone ala fissa, privo di piani di coda.

Come per i multi-rotori, i movimenti angolari che possono essere attuati sono roll, pitch, yaw i quali avvengono relativamente agli assi corpo: l'asse X diretto verso prua quindi parallelo alla fusoliera; l'asse Y diretto parallelamente alla direzione di sviluppo dell'ala, verso sinistra; l'asse Z verticale (figura 32); inoltre, c'è inoltre il grado di libertà connesso al gas ovvero alla spinta dell'unica elica, che interviene indirettamente nel bilanciamento del peso tramite la generazione della portanza.

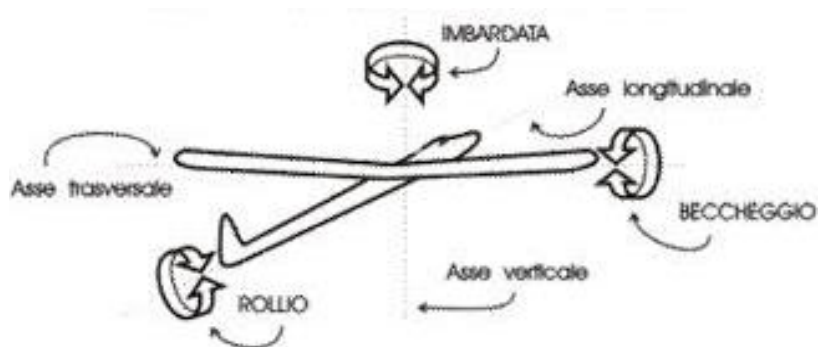


Figura 32 – Movimenti angolari attuabili da un drone ala fissa.

#### 5.2.4 Componenti elettronici

I principali componenti elettronici presenti nelle due tipologie di SAPR descritte in precedenza sono le batterie, il sistema di propulsione, la centralina ed il software di controllo, i sensori di bordo, il radiocomando, la telemetria ed il payload.



Le batterie, sono di solito di tipo LiPo (polimeri di litio) e forniscono la potenza necessaria ad alimentare tutti i restanti dispositivi a bordo ad eccezione del payload che in generale ha alimentazione indipendente. Tali batterie sono ricaricabili, hanno la capacità di erogare altissime correnti con pesi relativamente contenuti e sono caratterizzate da modesti tempi di ricarica modesti, circa 30-60 minuti.

Il sistema di propulsione è costituito essenzialmente dai motori elettrici e delle eliche. I motori maggiormente utilizzati sono di tipo brushless, ovvero “senza spazzole”, i quali risultano essere silenziosi e performanti. Le eliche, invece, sono in grado di trasformare la potenza fornita dall’albero motore in spinta propulsiva e, si caratterizzano dal numero di pale, dal tipo di materiale e da alcuni parametri geometrici che le identificano

La centralina di controllo è il componente elettronico principale di tutto il sistema che gestisce i movimenti eseguibili dal drone stesso a seconda dei comandi ricevuti da terra: roll, pitch, yaw e “gas” ed ha il compito di mantenere in equilibrio il drone usando i sensori di bordo, interpretare i comandi del pilota convertendoli in segnali per i motori, eseguire le funzioni di volo autonomi, verificare la funzionalità delle componenti di bordo ed inviare alla eventuale stazione di controllo i dati relativi la telemetria.

I sensori di bordo, generalmente riuniti in un unico chip elettronico denominato IMU (Inertial Measurement Unit, ovvero Unità di Misurazione Inerziale) in cui sono presenti alcuni sensori specifici quali accelerometri e giroscopi, consentono alla centralina di bordo di conoscere istante per istante l’assetto rispetto a un riferimento locale; inoltre, è quasi sempre presente anche un GPS attraverso il quale è possibile determinare la posizione del mezzo in termini di coordinate geografiche.

Il radiocomando è il dispositivo di controllo radio (R/C System, Radio Control System) operante in Italia sulla frequenza portante di 2,4 GHz attraverso il quale il pilota effettua sia il controllo dei movimenti del drone che altre impostazioni quali scattare una fotografia; tali operazioni vengono inviate tramite antenna trasmittente al drone che, a sua volta, ha un’antenna ricevente a bordo.

La telemetria è un secondo canale di comunicazione tra il drone ed una base station a terra attraverso la quale è possibile monitorare tutti i parametri di volo fra i quali la posizione, l’orientamento, la velocità, la rotta, e la tensione/corrente erogata dalle batterie.

Il payload, infine, è il carico utile che può essere sollevato in sicurezza dal drone ed è generalmente costituito da un sensore atto a acquisire specifiche tipologie di informazioni.

Per le applicazioni di tipo civile è possibile equipaggiare i SAPR con dei sensori miniaturizzati quali ad esempio delle fotocamere, delle videocamere, delle camere termiche o multispettrali, dei piccoli laser scanner, dei nasi elettronici e quant'altro. Nel caso specifico dell'acquisizione di foto e video, per aumentare la stabilità delle riprese può essere montato un gimbal, ossia un supporto cardanico corrisposto in due o tre assi che collega un giroscopio solidale al frame del drone al payload.

#### **5.2.4 Aspetti normativi relativi all'utilizzo dei SAPR**

Il panorama normativo inerente la materia è eterogeneo ed è composto dalla normativa internazionale, da quella comunitaria e da quella nazionale. Il rapporto tra queste fonti è di tipo gerarchico e, pertanto, quanto disposto da una forma normativa inferiore soccombe in presenza di disposizioni normative di una fonte superiore. Alla data odierna i riferimenti normativi che ciascun Stato membro della Comunità Europea deve prendere in considerazione per la regolamentazione nel proprio territorio nazionale sono la Circolare 328 dell'ICAO (International Civil Aviation Organization) del 2011, il Regolamento CE 216/2008, che rappresenta il cosiddetto regolamento basico con il quale sono state introdotte delle regole comuni per il settore dell'aviazione civile ed il Regolamento CE 785/2004, riguardante i requisiti assicurativi applicabili ai vettori aerei e agli esercenti di aeromobili.

Per quanto riguarda gli stati esteri in questa sede si vuole solamente citare, a titolo esemplificativo, la normativa in vigore in Australia, il primo paese al mondo a regolamentare l'uso dei droni per applicazioni civili, e quella in vigore in Francia.

In Australia l'ente per l'aviazione civile, la CASA "Civil Aviation and Safety Authority", ha emanato nel 2002 una regolamentazione per l'utilizzo dei droni in cui agli operatori viene rilasciata una sorta di patente che testimonia la capacità di pilotare il mezzo e di gestire le operazioni in sicurezza.

In Francia, invece, la DGCA ossia la Direzione Generale dell'Aviazione Civile, ha regolamentato l'utilizzo dei droni per applicazioni civili a partire dall'aprile del 2012. Le autorità francesi in poco meno di tre anni hanno autorizzato circa un migliaio di operatori e, recentemente, hanno annunciato l'intenzione di modificare alcune parti della normativa attuale per rimuovere alcuni ostacoli amministrativi nella normativa esistente al fine di

facilitare l'uso di droni civili. Gli operatori francesi possono richiedere l'autorizzazione per quattro differenti scenari di utilizzo dei droni: due per operazioni in cui il pilotaggio è a vista (scenari S1 e S3) e due per le operazioni in cui il pilotaggio del mezzo radiocomandato non avviene a vista (scenari S2 e S4), come illustrato nella figura sottostante.

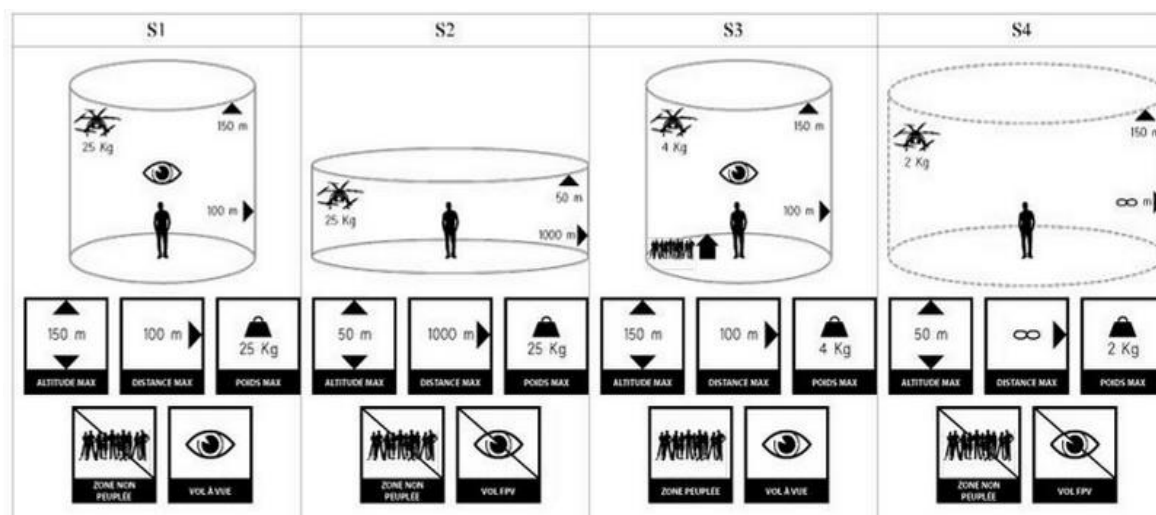


Figura 33 – Schematizzazione degli scenari operativi attualmente vigenti in Francia.

In Italia l'ENAC, l'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile, visto che negli ultimi anni il numero di droni utilizzati nel territorio nazionale a vario titolo, sia per scopi puramente amatoriali che per le più svariate applicazioni di tipo professionale, ha emanato il 18 dicembre 2013 il Regolamento "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto" che è entrato in vigore il 30 Aprile 2014. Alcuni mesi dopo, probabilmente anche per venire in contro alle varie associazioni degli operatori di settore che fin da subito hanno manifestato la loro contraria opinione circa alcuni aspetti presenti nel regolamento stesso, ENAC ha emanato due note esplicative, la prima il 9 ottobre 2014 e la seconda 17 dicembre dello stesso anno, con le quali si è cercato di semplificare l'iter autorizzativo e di introdurre ulteriori gli scenari operativi. Il 16 luglio del 2015 si è avuta un'ulteriore evoluzione della normativa italiana in materia di droni con la pubblicazione la seconda edizione del Regolamento "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto".

Nel regolamento sono distinte due tipologie di Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto:

- I Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR), ossia i mezzi impiegati o destinati all'impiego in operazioni specializzate (lavoro aereo);

- Gli Aeromodelli, che sono dei mezzi impiegati esclusivamente per scopi ricreazionali e sportivi e che non sono considerati aeromobili ai fini del loro assoggettamento alle previsioni del Codice della Navigazione.

I SAPR, a loro volta, sono stati suddivisi in due categorie di peso: quelli inferiori ai 25 kg e quelli di peso uguale o maggiore e non superiore a 150 kg. Per quanto attiene i mezzi del segmento inferiore, che ad oggi rappresentano la quasi totalità dei SAPR utilizzati per gli scopi professionali, sono state individuate due differenti tipologie di operazioni di volo:

- A) operazioni non critiche, ossia quelle tipicamente quelle condotte in uno scenario operativo nel quale in caso di malfunzionamenti non si prevedono ragionevolmente danni a terzi. In tali tipologie di operazioni la responsabilità è lasciata all'operatore che valuta la criticità e l'idoneità del sistema utilizzato. Esse sono condotte nel volume di spazio "V70", ossia all'interno di un cilindro avente come dimensioni massime un'altezza di 70 m ed il raggio di 200 m, e nell'ambito delle seguenti condizioni:
- ad una distanza orizzontale di sicurezza adeguata dalle aree congestionate, ma non inferiore a 150 m, e ad una distanza di almeno 50 m da persone e cose, che non siano sotto il diretto controllo dell'operatore;
  - in condizioni di luce diurna;
  - in spazi aerei non controllati;
  - fuori dalle ATZ e comunque ad almeno 8 km dal perimetro di un aeroporto e dai sentieri di avvicinamento/decollo di/da un aeroporto.
- B) operazioni critiche, in cui è previsto il sorvolo di aree congestionate o di infrastrutture industriali. Questo tipo di operazioni sono autorizzate dall'ENAC sulla base di accertamenti che tengono conto della complessità del sistema e della criticità degli scenari operativi. Con la "Nota Esplicativa del 17 dicembre 2014" sono stati introdotti gli "Scenari a criticità mista" in cui è possibile svolgere delle operazioni condotte all'interno, o in vicinanza, di aree tipicamente congestionate o in presenza di assembramenti di persone, o infrastrutture "sensibili", per le quali è possibile definire una "zona franca" per le operazioni, intendendo per zona franca una zona di rischio minimizzato in quanto all'interno della quale non ci sono persone, se non indispensabili per le operazioni.

L'iter autorizzativo che ciascuna organizzazione deve seguire per poter utilizzare i SAPR è diverso, a seconda della massa del drone ed a seconda del livello di criticità delle

operazioni che si dovranno realizzare. Per i SAPR aventi massa inferiore ai 25 kg per realizzare operazioni specialistiche “non critiche” consiste nel presentare ad ENAC una serie di documentazioni (modulo delle limitazioni, manuale di volo del mezzo, manuale delle operazioni e programma di manutenzione) ed una dichiarazione che attesti

- a. di assumersi tutte le responsabilità in merito alle operazioni;
- b. che le operazioni possono essere condotte in sicurezza;
- c. di disporre di un'organizzazione adeguata per gestire le operazioni ed effettuare le manutenzioni necessarie;
- d. di avere stabilito un manuale delle operazioni;
- e. che il pilota/i piloti sono qualificati, ossia che abbiamo una riconosciuta conoscenza delle regole dell'aria, che sia stati addestrati per l'utilizzo dello specifico SAPR e che siano idonei da un punto di vista fisico;
- f. che è stata stipulata l'assicurazione per danni verso terzi.

Ricevuta la domanda ed effettuati gli opportuni controlli ENAC provvede ad inserire il nominativo dell'operatore nell'elenco di quelli riconosciuti ad operare in accordo alle limitazioni e condizioni definite nella dichiarazione.

Per i SAPR avente massa superiore a 25 kg, invece, l'operatore per ottenere l'autorizzazione da parte di ENAC deve presentare specifica domanda in cui, oltre ad indicare le condizioni e i limiti applicabili alle operazioni di volo previste, deve allegare la seguente documentazione:

- a. I dati della targhetta identificativa del SAPR, la descrizione e la configurazione del sistema da impiegare, nonché le caratteristiche e le prestazioni tali da garantirne un impiego sicuro ovvero la dichiarazione di conformità rilasciata dal costruttore, nel caso di SAPR in possesso di certificato di tipo;
- b. i risultati delle prove dell'attività sperimentale iniziale;
- c. la tipologia delle operazioni specializzate che intende svolgere;
- d. i termini temporali per i quali è richiesta l'autorizzazione;
- e. i risultati dell'analisi del livello di rischio associato alle operazioni previste, eseguita al fine di sostanziare la sicurezza delle stesse;
- f. il manuale di volo dell'APR o documento equivalente;
- g. il programma di manutenzione del SAPR;
- h. il manuale delle operazioni, inclusa la descrizione delle modalità di valutazione e gestione del rischio.

L'ENAC rilascia l'autorizzazione al completamento con esito positivo della valutazione della documentazione prodotta da parte dell'operatore per sostanziare la capacità di effettuare l'attività in sicurezza. Nell'ambito delle valutazioni, l'ENAC si riserva di richiedere l'effettuazione di ulteriori analisi e prove e di condurre eventuali ispezioni.

Nella sezione dedicata del sito internet dell'ENAC, a cui si rimanda per ulteriori informazioni ed approfondimenti, è presente anche l'elenco degli operatori autorizzati, cioè quelli che, ai sensi del Regolamento "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto" hanno ottenuto un'autorizzazione da parte dell'ENAC per operare con gli APR sia per operazioni specializzate non critiche che per quelle critiche, nonché operatori di APR con MTOM  $\geq$  25 kg per qualunque tipo di operazione.

### **5.3 Principali applicazioni nel campo dell'ingegneria**

I sistemi aeromobili a pilotaggio remoto trovano molteplici applicazioni in ambito civile, dalle più tradizionali, come la realizzazione di prodotti cartografici a risoluzione centimetrica, alle più fantasiose quali ad esempio le riprese video da inquadrature mozzafiato di eventi sportivi o relative a scene cinematografiche; in ogni caso, i SAPR devono essere sempre impiegati nel rispetto delle normative che ne regolamentano l'utilizzo (vedasi il paragrafo 5.5).

#### **5.3.1 Prodotti cartografici**

La realizzazione di prodotti cartografici, quali ortofoto e modelli digitali delle elevazioni (DEM), viene effettuata attraverso l'utilizzo di software specifici, sia di tipo commerciale che open source, in cui vengono processati le fotografie acquisite da SAPR, seguendo le regole dell'aerofotogrammetria classica a cui si rimanda per gli approfondimenti del caso. La figura seguente riporta a titolo esemplificativo uno schema di un semplice piano di volo in cui sono indicati le sovrapposizioni laterali (in giallo) e lungo la direzione di avanzamento (in rosso) dei singoli fotogrammi.

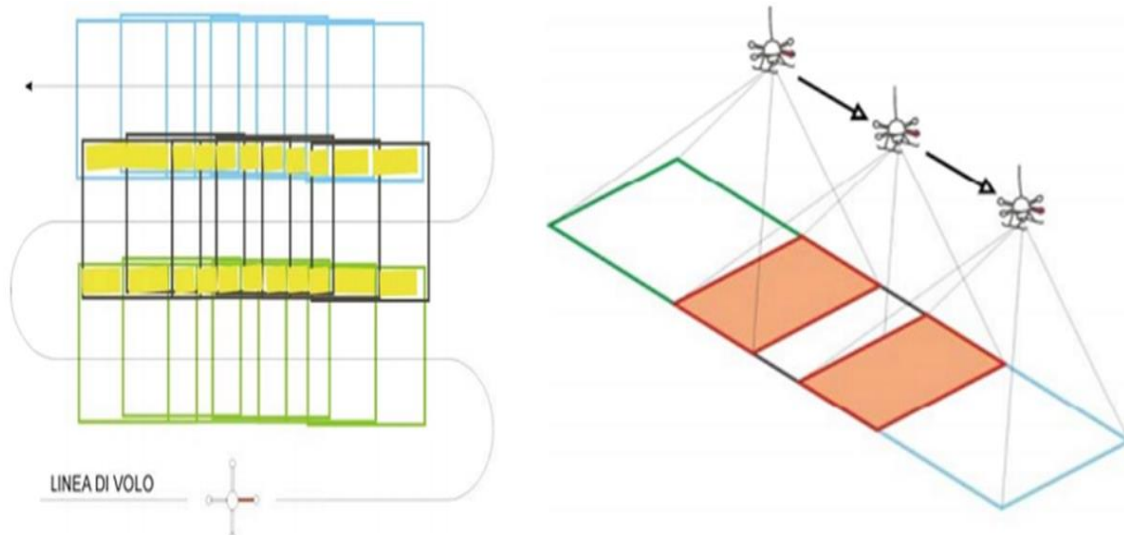


Figura 34 – Schema di piano di volo per la realizzazione di prodotti cartografici da drone.

Successivamente, una volta prodotti il DEM ed ortofoto, è possibile realizzare tramite l'utilizzo di software di tipo CAD o in ambiente GIS le restituzioni degli elementi del territorio (curve di livello, punti quotati, profili longitudinali, mappe delle pendenze, ecc...) e dei manufatti ivi presenti (edifici, strade, infrastrutture, ecc...).

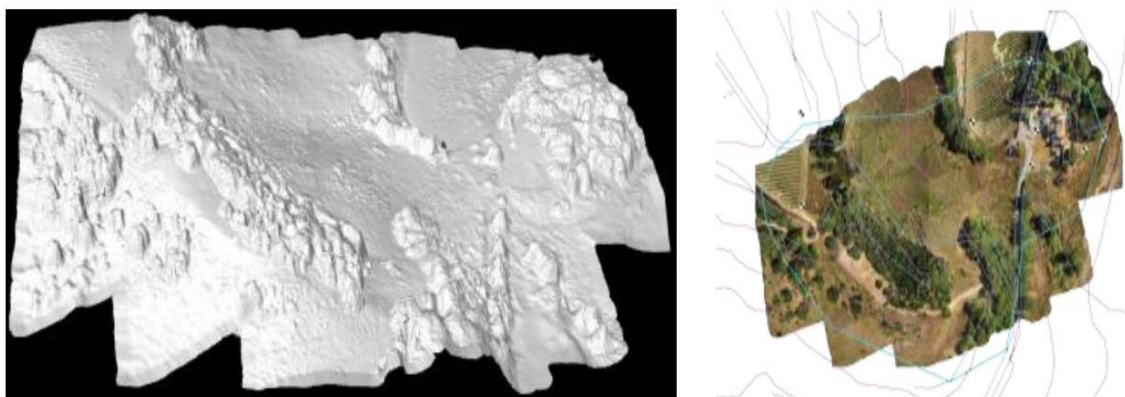


Figura 35 – Esempio di un DEM e relativa ortofoto realizzati a partire dall'elaborazione di immagini acquisite da drone (Remondino et al., 2011).

I prodotti cartografici così realizzati possono essere utilizzati per molteplici scopi e sono caratterizzati dall'aver elevatissime risoluzioni spaziali, anche dell'ordine di pochi centimetri, in funzione della quota di volo e del sensore fotografico utilizzato per le riprese. Inoltre, per migliorare l'accuratezza delle restituzioni è buona norma acquisire, congiuntamente alla realizzazione del volo del drone, anche le coordinate planimetriche ed altimetriche di alcuni punti localizzati all'interno dell'area da riprendere; generalmente il rilievo delle coordinate è effettuato tramite l'utilizzo di sistemi GPS o di stazioni totali.

### 5.3.2 Rilievi dei beni culturali

I rilievi dei beni culturali, come i siti archeologici o centri storici che si sviluppano su aree di estensioni variabili, è sempre stato abbastanza problematico per la mancanza di strumenti adeguati che permettono di colmare il gap tra i classici rilievi fotogrammetrici aerei e i rilievi terrestri (Lo Brutto et al., 2013). Ad esempio, durante la realizzazione di scavi archeologici risulta essere di fondamentale importanza monitorare le nuove aree scavate giorno per giorno in modo da essere in grado di pianificare le future attività di scavo. Per soddisfare tale esigenza, oltre ad utilizzare soluzioni tradizionali quali l'impiego di stazioni totali o di fotocamere montate su delle aste lunghe qualche metro, è possibile utilizzare dei SAPR in grado di acquisire a basse quote dei fotogrammi con un elevato livello di dettaglio (Rinaudo et al., 2013) dai quali ricostruire tridimensionalmente manufatti ed opere con un'elevatissima risoluzione (anche dell'ordine del centimetro). Nel caso dei rilievi architettonici, invece, tali tipologie di informazioni spesso utilizzate ad integrazione di quelle ricavate tramite l'utilizzo a terra di altra strumentazione specifica, come ad esempio i sistemi a scansione laser, possono essere utilizzate sia per la documentazione dello stato di fatto che come base di partenza per la redazione di progetti di recupero e restauro.



Figura 36 – Ricostruzioni tridimensionali di beni culturali; a sinistra la parte apicale di un campanile (Toschi et. al, 2014), a destra una porzione di area archeologica (Pampalone et al., 2011).

### 5.3.3 Ispezioni di impianti ed infrastrutture

Le operazioni di monitoraggio sono di fondamentale importanza per qualsiasi tipo di struttura sia durante la costruzione, durante la quale occorre controllare che lo stato di avanzamento dei lavori rispetti alle ipotesi progettuali, sia durante la fase di esercizio per consentire di ottimizzare la manutenzione e garantire elevati standard di sicurezza. Il tema



diviene particolarmente complesso nel caso di impianti ed infrastrutture soprattutto se esse risultano essere difficilmente o del tutto non accessibili per le più svariate ragioni, quali ad esempio la loro dimensione, la loro posizione e per questioni relative la sicurezza e l'incolumità del personale impiegato. L'utilizzo congiunto di informazioni acquisite da droni, equipaggiati con differenti tipologie di sensori quali quelli fotografici o termici, e quelle acquisite in altro modo tramite ulteriori sensori e/o strumentazioni può garantire la realizzazione di accurate campagne di monitoraggio al fine di poter valutare l'evoluzione nel tempo dello stato della struttura e, laddove sia necessario, di individuare le tecniche di intervento più adeguate. Tra le applicazioni che si possono realizzare in questo contesto vi sono:

- la valutazione quantitativa dell'efficienza degli impianti industriali e di quelli per la produzione dell'energia elettrica come ad esempio i campi fotovoltaici, le turbine eoliche e le centrali termoelettriche;
- l'individuazione dello stato di usura dei tralicci e delle antenne di trasmissione, quali gli elettrodotti e le altre infrastrutture utilizzate per le telecomunicazioni ed il trasferimento dei segnali tele-radiofonici;
- il monitoraggio del degrado degli elementi strutturali, come nel caso dei viadotti stradali e ferroviari, delle coperture degli edifici, di dighe e di altre opere architettoniche di difficile accesso.

La figura seguente riporta sulla parte sinistra due droni che volano sopra un campo fotovoltaico ed in prossimità di una campata di un ponte; mentre, nella parte destra vi sono due immagini acquisite da UAV relative una la parte superiore dei due isolatori di un traliccio dell'alta tensione e l'altra una porzione di una turbina eolica.

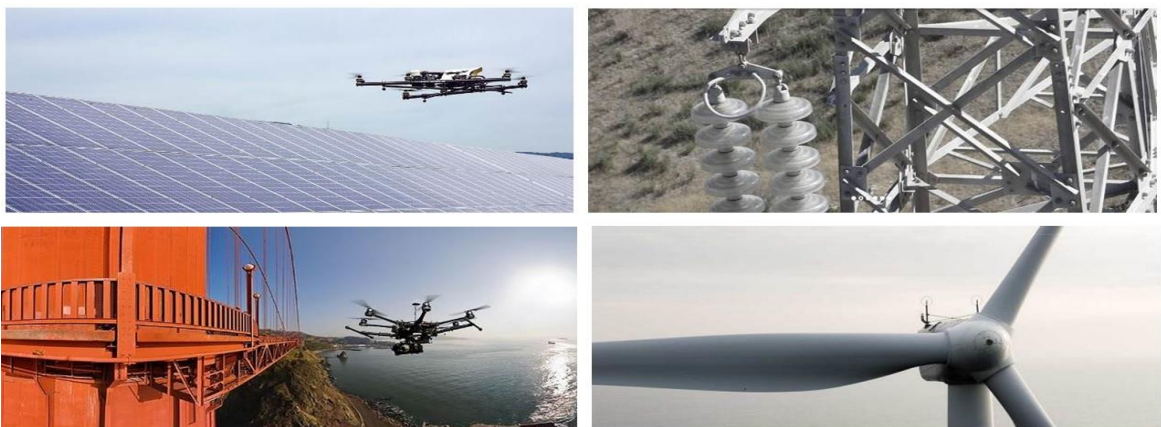


Figura 37 – Esempi di utilizzo di droni per la realizzazione di ispezioni di impianti ed infrastrutture.

### 5.3.4 Altre applicazioni

Oltre alle applicazioni brevemente descritte in precedenza, i SAPR possono essere utilizzati anche in altri contesti, quali ad esempio:

- il monitoraggio ambientale, dove è possibile realizzare ad esempio delle operazioni di prevenzione degli incendi, utilizzando dei droni ad ala fissa in grado di ispezionare grandi aree individuando luoghi in cui la temperatura si sta alzando in maniera anomala, o effettuare dei controlli della qualità dell'aria, montando a bordo del SAPR dei sensori elettronici il drone in grado di analizzare in tempo reale l'eventuale presenza di alcuni parametri inquinanti;
- l'agricoltura di precisione, in cui possono essere utilizzati o per raccogliere informazioni quali-quantitativi estremamente dettagliate di determinati territori oppure per effettuare alcuni trattamenti specifici in sostituzione ad i mezzi tradizionali. La parte sinistra della figura sottostante riporta una mappa tematica di una porzione di un vigneto ricavata a partire dall'analisi della radiazione elettromagnetica riflessa delle piante; a destra, invece, è riportato un SAPR utilizzato nella lotta biologica ai parassiti sui campi di mais tramite il rilascio di piccole capsule di cellulosa contenenti le uova di un insetto che contrasta la loro diffusione;



Figura 38 – Sulla sinistra una mappa tematica di una porzione di un vigneto ricavata a partire dall'analisi della radiazione elettromagnetica riflessa delle piante; a destra, invece, è riportato un SAPR utilizzato nella lotta biologica ai parassiti sui campi di mais tramite il rilascio di piccole capsule di cellulosa contenenti le uova di un insetto che contrasta la loro diffusione.

- la realizzazione di applicazioni di realtà aumentata, in cui video o ricostruzioni tridimensionali di luoghi realizzati tramite l'utilizzo di droni possono essere utilizzati a supporto per specifiche finalità, quali ad esempio la realizzazione di tour

virtuali territorio di particolare pregio storico-paesaggistico o la realizzazione di accurati piani di monitoraggio di particolari strutture.

- le applicazioni in progetti di ricerca, dove Università, enti di ricerca ed aziende private utilizzano i droni sia per applicazioni sperimentali che per cercare nuove soluzioni tecnologiche finalizzate alla continua evoluzione dei singoli componenti costituenti tali strumenti.

Infine, è anche possibile utilizzare i droni per realizzare foto e video panoramici per scopi cinematografici o giornalistici, per finalità turistiche e di valorizzazione del territorio, per la ripresa di eventi sportivi e per tutte quelle altre possibili applicazioni che sono consentite dai regolamenti di legge vigenti.

#### **5.4 Riferimenti bibliografici**

Aibotix Italia S.r.l.(2015). “Dispense del Corso Teorico certificato ENAC per Piloti APR”.

Civil Aviation and Safety Authority, Governo Australiano. (2012). <https://www.casa.gov.au/operations/standard-page/remotely-piloted-aircraft-rpa>

Direction générale de l'aviation civile, Ministero dell'Ecologia Sviluppo Sostenibile ed Energia – Francia (2012). <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Effectuer-des-activites>

Fahlstrom P. G., Gleason T. J. (2012). “Introduction to UAV Systems”. John Wiley & Sons, Ltd, ISBN: 9781119978664.

Lo Brutto M., Meli P., Ceccaroni F., Casella M. (2013). “Studio delle potenzialità delle piattaforme UAV nel campo del rilievo dei Beni Culturali”. Atti 17a Conferenza Nazionale ASITA, pp 877-884.

Negrello F. (2012) “Progettazione cinematica e strutturale di un UAV ad ali battenti con analisi della stabilità di volo”. [http://www.dicat.unige.it/bottaro/Presentation%20group/Tesi\\_Negrello.pdf](http://www.dicat.unige.it/bottaro/Presentation%20group/Tesi_Negrello.pdf)

- Office of the Secretary of Defence, USA. “Eyes of the Army, U.S. Army Roadmap for UAS 2010 2035”. <http://www.rucker.army.mil/usaace/uas/US%20Army%20UAS%20RoadMap%202010%202035.pdf>.
- Pampalone V., Borruso A., D’Argenio A., Julitta F., Mancon L. (2011). “Rilievo e rappresentazione 3D di siti archeologici attraverso tecniche di fotogrammetria di prossimità mediante micro e mini UAV”. Atti 15a Conferenza Nazionale ASITA, pp 471 – 478.
- Remondino F., Barazzetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D. (2011). “UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling - Current status and future perspectives”. ISPRS Archives, Vol.XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland.
- Rinaudo F., Chiabrando F. Lingua A., Spanò A. (2012). “Archaeological site monitoring: uav photogrammetry can be an answer”. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5.
- Salvo G., Caruso L., Scordo A., Guido G., Vitale A. (2014). “Comparison between vehicle speed profiles acquired by differential GPS and UAV”. EWGT2014 – 17th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, Seville (Spain)
- Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto, ENAC Italia. [http://www.enac.gov.it/la\\_regolazione\\_per\\_la\\_sicurezza/navigabilit-13/sistemi\\_aeromobili\\_a\\_pilotaggio\\_remoto\(sapr\)/index.html](http://www.enac.gov.it/la_regolazione_per_la_sicurezza/navigabilit-13/sistemi_aeromobili_a_pilotaggio_remoto(sapr)/index.html)
- Toschi I., Dubbini M., Rivola R., Galletti M., Capra A.(2014). ”Integrazione di dati acquisiti da piattaforme UAV e terrestri per la modellazione 3D di beni culturali” <http://3dom.fbk.eu/files/uav/slides/toschi.pdf>

## **CAPITOLO 6**

### **Strumentazione utilizzata e metodologia proposta**

#### **6.1 Introduzione**

Le applicazioni sperimentali condotte nel corso della presente ricerca hanno avuto come obiettivo la verifica della validità dell'utilizzo dei SAPR come strumento di monitoraggio del traffico, sia dal punto di vista tecnico sia sulla qualità e quantità di informazioni ottenibili. Scopo del presente capitolo è quello di descrivere la strumentazione utilizzata e la metodologia di rilevamento dei flussi di traffico proposta. Nello specifico, vengono descritte prima le caratteristiche principali delle strumentazioni utilizzate per la realizzazione delle attività sperimentale, ossia due SAPR ad asse verticale ed un veicolo sonda equipaggiato di un GPS di tipo differenziale e, successivamente, la metodologia messa a punto.

#### **6.2 I SAPR utilizzati**

Durante le attività sperimentali condotte si sono testati due differenti micro-droni radiocomandati di tipo professionale, entrambi appartenenti alla classe VTOL "Vertical Take-Off and Landing", ossia in grado di decollare ed atterrare in verticale in poco spazio.

Come già detto nel capitolo precedente, tali tipologie di SAPR rispetto alle altre piattaforme di volo tradizionali, sia satellitari che aeree o elicotteri, presentano numerosi vantaggi tecnici e logistici quali la possibilità di acquisire con elevata risoluzione spaziale, la tempestività nella messa in esercizio e l'ottenimento dei dati ed i ridotti costi di esercizio. Entrambi i droni a asse verticale testati sono stati equipaggiati con una GoPro HERO 3 Black Edition, una action cam di peso e dimensioni molto contenute (figura 39) in grado di catturare filmati fino a 4k e fotografie con una risoluzione di 12 megapixel.



Figura 39 - GoPro HERO 3 Black Edition.

I due UAV sono dotati di un sistema di pilotaggio automatico attraverso il quale, il pilota prima di realizzare il volo è in grado di pianificare tramite l'utilizzo di mappe disponibili in rete (ad esempio quelle fornite da Google Earth) la rotta e le operazioni che il mezzo dovrà compiere. Nello specifico, attraverso l'utilizzo di uno specifico software, viene generato un piano di volo, sotto forma di file, contenente le seguenti informazioni:

- le velocità degli spostamenti del drone (di salita/discesa, di avanzamento e di ritorno al punto di decollo in caso di malfunzionamento o di interruzione del piano di volo);
- coordinate GPS che il drone dovrà raggiungere come traguardi “parziali” (waypoints), espresse in termini di longitudine, latitudine e quota di volo;
- le azioni che deve compiere durante il tragitto ed in prossimità dei waypoints, come ad esempio scattare una fotografia e/o cambiare l'inclinazione (roll e pitch) del sensore.

Infine, appare opportuno sottolineare che i due SAPR utilizzati sono conformi al Regolamento ENAC attualmente in vigore e, pertanto, se pur con le dovute autorizzazioni e limitazioni, possono essere impiegati nel territorio italiano per la realizzazione di operazioni di tipo specialistico.

### 6.2.1 Drone AirVision NT4-contras

Il primo SAPR utilizzato è un AirVision NT4-contras di proprietà della società E. Lab, uno Spin-Off Accademico dell'Università degli Studi di Palermo. Il drone, interamente realizzato in fibra di carbonio ed avente otto rotori disposti in maniera contrapposta su quattro braccia, è fornito di un radiocomando con display integrato e di stazione di controllo a terra (figure 40 e 41), ha un sofisticato sistema inerziale, è dotato di sottosistemi integrati di volo ed è caratterizzato dall'avere un payload massimo di 500 grammi ed un'autonomia di volo di circa 10 minuti.



Figura 40 – micro-drone airvision nt4-contras.



Figura 41 – radiocomando con display integrato (parte sinistra) e stazione di controllo a terra (destra) del micro-drone airvision nt4-contras.

La tabella 4 riporta le principali caratteristiche e funzionalità del micro-drone AirVision NT4-contras utilizzato.

Caratteristiche tecniche	Descrizione
Dimensioni	65x65x50 cm
Peso al decollo	5,0 – 5,5 kg
Corpo	Fibra di carbonio
Motori	Di tipo brushless
Payload	500 g
Alimentazione	Batterie LiPo
Tempo di volo	Fino a 15 min
Velocità del vento	Fino a 5 m/s
Temperatura Operativa	Da 5°C a 40°C
GPS	Si
Modalità di pilotaggio	Manuale / Voli pianificati
Qualità del video	Fino a 4K

Tabella 4 – Principali caratteristiche tecniche del micro-drone AirVision NT4-contras

### 6.2.2 Drone Aibotix X6

Il secondo micro-drone utilizzato, un Aibotix X6 acquistato dal DICAM dell'Università degli Studi di Palermo nell'ambito di un progetto di ricerca, è un esacottero di ultima generazione caratterizzato dall'aver un'elevata ingegneria elettronica, una struttura in fibra di carbonio con protezione dei rotori e un alloggiamento per i sensori con controllo remoto delle funzionalità. Il drone, inoltre, oltre ad avere le funzioni di decollo e atterraggio assistiti, è caratterizzato dall'aver una funzione detta in gergo "gabbia" attraverso la quale via software è possibile definire, a partire dal punto di decollo, un cilindro entro il quale il SAPR può agire: nel caso in cui il mezzo cerca di uscire da tale spazio, sia per volontà del pilota che a causa di un malfunzionamento, il SAPR viene bloccato al bordo della gabbia in maniera automatica.

La figura seguenti riportano l'Aibotix X6, il radiocomando dotato di stazione ricevente dei dati relativi la telemetria ed il display; a seguire una tabella con le principali caratteristiche tecniche.





Figura 42 – Micro-drone Aibotix X6 (sopra), radiocomando dotato di stazione ricevente della telemetria (in basso a sinistra) e display (in basso a destra).

Caratteristiche tecniche	Descrizione
Dimensioni	105x105x45 cm
Peso al decollo	4,6 – 6,6 kg
Corpo	Fibra di carbonio
Motorii	Di tipo brushless
Payload	2000 g
Alimentazione	Batterie LiPo
Tempo di volo	Fino a 30 min
Velocità del vento	Fino a 13 m/s
Temperatura Operativa	Da -5°C a 40°C
GPS	Si
Modalità di pilotaggio	Manuale / Voli pianificati
Qualità del video	Fino a 4K

Tabella 5 – Principali caratteristiche tecniche del micro-drone Aibotix X6

### 6.3 Veicolo sonda equipaggiato con un GPS differenziale

Per verificare il livello di accuratezza del rilevamento dei veicoli individuati attraverso l'interpretazione di un video acquisito da drone è necessario utilizzare una seconda tecnica di rilevamento delle grandezze cinematiche del traffico. In questa sede si è deciso di utilizzare un veicolo sonda, tecnica descritta nel precedente paragrafo 4.4, dotato di un GPS e di un'antenna esterna in grado di ricavare la propria posizione con una notevole precisione (fino a 10 - 20 cm) attraverso la ricezione di una correzione di tipo differenziale via GSM da una rete di stazioni permanenti dislocata nel territorio.

Per la realizzazione del rilievo l'antenna esterna del GPS deve essere posizionata sul tetto della macchina impiegata come veicolo sonda mentre il dispositivo palmare ricevente, che acquisisce utilizzando la funzione "traiettoria" le coordinate geografiche del veicolo sonda nel tempo, deve essere all'interno dell'abitacolo dello stesso. La figura 43 riporta il GPS di tipo differenziale impiegato, a seguire una tabella con le sue principali specifiche tecniche.



Figura 43 – GPS di tipo differenziale (Topcon GRS-1) installato sul veicolo sonda: sopra l'antenna posizionata sul tetto della macchina, sotto il dispositivo palmare ricevente.

Caratteristiche tecniche	Descrizione
Dimensioni	9,3x21,5x5,3 cm
Peso	0,77 kg (con batterie)
Temperatura Operativa	Da -20°C a 50°C
Sistema Operativo	Windows Mobile 6.1
Tipologia di ricevitore GPS	G – GPS L1 GD – GPS L1/L2 GGD – GPS/GLONASS L1/L2
Accuratezza	circa 0,4 cm (statico) circa 1,5 cm (cinematico) circa 20- cm (DGPS, post processing)

Tabella 6 – Principali caratteristiche tecniche del GPS differenziale Topcon GRS-1

## 6.4 Metodologia di rilevamento dei flussi di traffico

La metodologia di rilevamento dei flussi di traffico sviluppata nel corso della presente attività si basa sul presupposto che da un drone in volo in prossimità di una strada è possibile rilevare i flussi di traffico veicolare attraverso l'acquisizione di un video acquisito da punto di vista nadirale, ossia con la videocamera che inquadra la strada in modo più orizzontale possibile. Nello specifico, la metodologia messa a punto è suddivisa in tre fasi: la prima riguarda la realizzazione del rilievo in pieno campo, la seconda il processamento del video acquisito da drone e la terza, infine, la stima delle grandezze cinematiche di interesse.

### 6.4.1 Realizzazione del rilievo in pieno campo

La prima fase della metodologia, consistente nel realizzare contemporaneamente il rilievo attraverso l'utilizzo delle due strumentazioni descritte nei paragrafi precedenti, è generalmente preceduta dalle operazioni di pianificazione delle attività da realizzare durante il rilievo UAV. Nello specifico, una volta individuato il tratto di strada su cui

dover realizzare i voli con il drone, per prima cosa occorre definire il punto di decollo e quello di atterraggio (che generalmente coincidono). Successivamente, in relazione alla prefissata dimensione a terra dei pixel ed alle caratteristiche della action cam, si determina la quota di volo. A questo punto è possibile effettuare la pianificazione del volo automatico che consiste nella realizzazione delle seguenti azioni: decollo, raggiungimento del punto di ripresa, stazionamento condizioni di hovering ossia con velocità nulla ed a quota costante sopra il tratto di rete stradale da investigare, discesa ed atterraggio. Nel caso in cui la durata della ripresa necessaria ai fini del rilevamento dei flussi di traffico sia maggiore del tempo di stazionamento in condizioni di hovering del SAPR è necessario suddividere il rilievo in due o più voli.

Inoltre, prima di iniziare i rilievi è buona norma posizionare all'interno della scena acquisita dalla videocamera alcuni punti di controllo a terra (GCP) al fine di semplificare le successive fasi di elaborazione del video acquisito da drone; è consigliabile posizionare anche un ulteriore punto di controllo sul cofano anteriore del veicolo sonda in modo da minimizzare il più possibile gli errori nella successiva operazione di tracciamento nel tempo del veicolo sonda (figura 44).



Fig. 44 - Alcuni GCP posizionati per semplificare le successive fasi di elaborazione: a sinistra quello sul cofano del veicolo sonda, al centro ed a destra due messi a terra.

Una volta ultimate tutte queste operazioni preliminari, è possibile realizzare in maniera congiunta i rilievi con il veicolo sonda e con il drone; nello specifico:

- il rilievo GPS viene condotto da due operatori, uno alla guida e l'altro al controllo della strumentazione che, prima di avviare l'acquisizione dei dati GPS in modalità "traiettoria" con una frequenza di campionamento pari ad un secondo, deve aspettare

qualche minuto in modo tale che il livello di accuratezza con cui la strumentazione fornisce la posizione sia sufficiente elevata;

- il rilievo UAV, impiega una squadra di volo composta generalmente da due/tre operatori: un pilota, un addetto alla gestione della base di terra (controllo telemetrie del volo) ed un eventuale terzo operatore a supporto per la gestione delle fasi più critiche, ossia il decollo e l'atterraggio.

Una volta ultimati entrambi i rilievi occorre effettuare un controllo delle informazioni acquisite, ossia accertarsi che il GPS differenziale abbia memorizzato le traiettorie del veicolo sonda e che si siano registrati i video acquisiti dall'alto.

#### **6.4.2 Processamento del video**

Una volta effettuato il rilievo in campo occorre effettuare il processamento dei video acquisiti da drone relativi al tratto di rete stradale oggetto di indagine. Le operazioni da effettuare per ciascun volo effettuato sono:

- La rimozione dell'effetto fisheye;
- La selezione delle sole parti significative del video;
- L'estrazione di alcuni frame;
- La georeferenziazione dei frame estratti;
- L'individuazione della posizione del veicolo sonda nei vari frame georeferiti;
- La valutazione dell'accuratezza dei risultati ottenuti.

La prima operazione, ossia la rimozione dell'effetto fisheye, consiste nel ridurre l'effetto di distorsione del video causata dall'obiettivo grandangolare che curva l'immagine e viene realizzata attraverso l'utilizzo del software gratuito "GoPro Studio".

La selezione delle sole parti significative del video può essere effettuata con un qualunque software di video editing tagliando le porzioni di video non significative ai fini dello studio, ossia quelle relative al decollo, il tragitto fino al raggiungimento del punto di ripresa e all'atterraggio.

Successivamente occorre effettuare l'estrazione di alcuni frame dalle porzioni di video precedentemente tagliate; per fare questa operazione sono disponibili dei software, quali ad esempio "AVS Video Converter" o "Video Charge Studio", con i quali l'operazione di estrazione dei frame è automatizzata e l'operatore deve solamente impostare alcune

caratteristiche come ad esempio il numero di frame al secondo da estrarre. Per determinare il numero di frame da processare per ogni secondo si è scelto in maniera casuale un veicolo tra quelli transitati lungo un tratto di strada analizzato in una delle prove sperimentali effettuata e, per l'intervallo di tempo in cui esso è stato ripreso dal video effettuato da drone, sono stati estratti quattro frame al secondo. I frame estratti sono stati processati seguendo tutta la metodologia massa a punto e sono stati determinati tre differenti profili di velocità: il primo considerando un solo frame al secondo, il secondo con due frame al secondo ed il terzo con tutti i frame precedentemente estratti. Effettuando il confronto tra i coefficienti  $R^2$  delle tre curve di regressione si è deciso di analizzare un solo frame al secondo. La figura 45 riporta i tre differenti profili di velocità del veicolo scelto in maniera casuale.

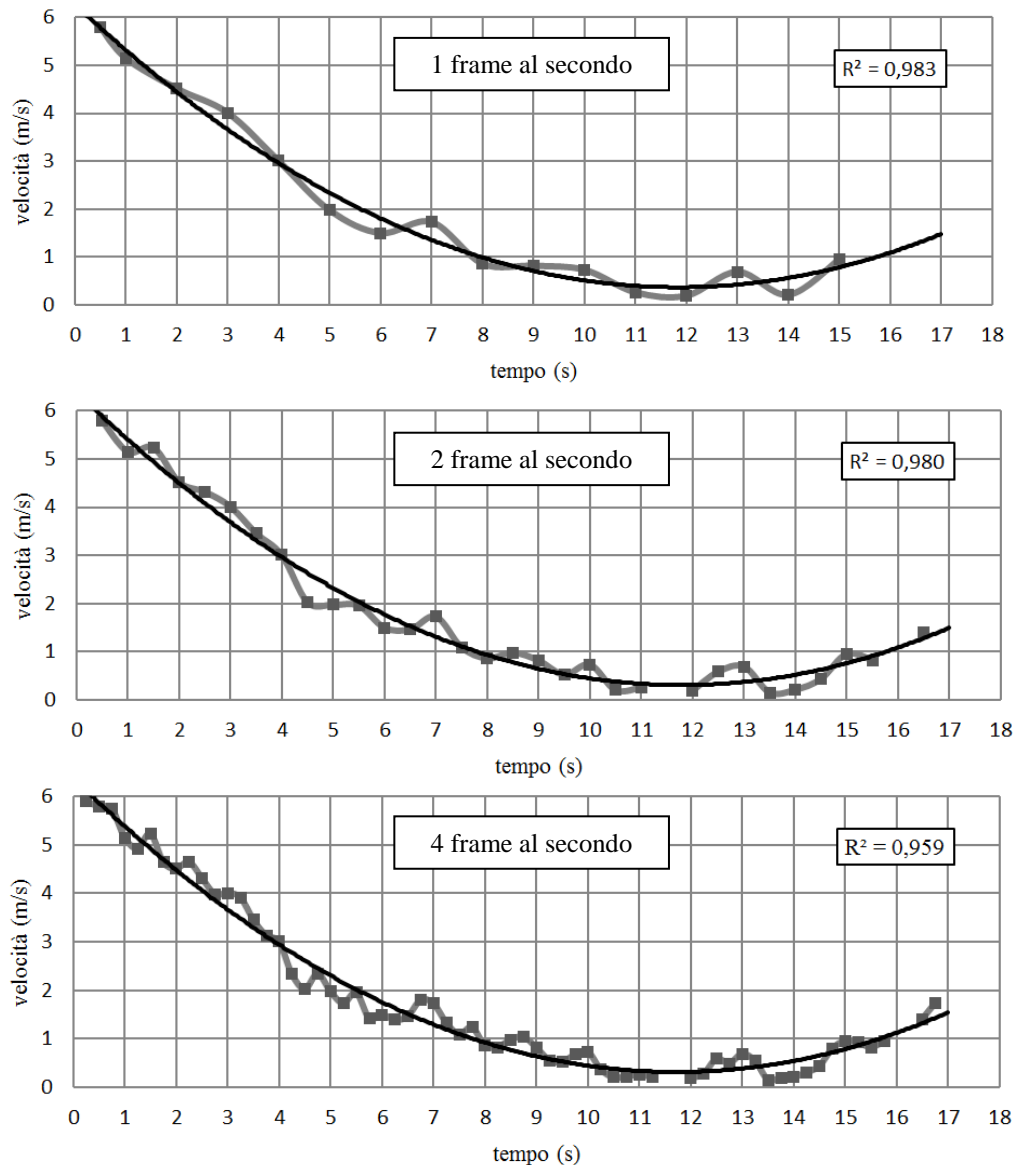


Figura 45 – Profili di velocità di un veicolo campione analizzando 1, 2 e 4 frame al secondo.

Una volta estratti i soli frame di interesse si deve effettuare in ambiente GIS la georeferenziazione, ossia quel processo che permette di associare ad un ogni pixel di ciascuna delle immagini raster (frame) una coppia di coordinate geografiche (x, y), che ne fissino la posizione sulla superficie terrestre secondo un determinato sistema di riferimento. Per realizzare tale operazione occorre, quindi, conoscere le coordinate geografiche di alcune geometrie facilmente identificabili nell'immagine da georiferire; tali coordinate possono essere ricavate direttamente in campo attraverso l'utilizzo di dispositivi GPS aventi un'elevatissima accuratezza (precisione millimetrica) oppure identificando in un altro raster già georiferito le stesse geometrie. In questa sede si è deciso di effettuare le georeferenziazioni dei frame utilizzando delle immagini base di riferimento relative le porzioni di tratto stradale in cui è stato realizzato il rilievo in pieno campo già dotate di coordinate geografiche. Nello specifico, dopo aver individuato per ciascun raster da georiferire dieci coppie di punti omologhi distribuiti lungo il tratto di strada di interesse, si può procedere alla georeferenziazione utilizzando, tra i vari algoritmi di trasformazione presenti in letteratura, una trasformazione di tipo lineare che, effettuando una semplice roto-traslazione dell'immagine da georiferire, non introduce alcuna distorsione ai frame. L'accuratezza complessiva di tale operazione è valutabile attraverso la media dell'errore RSM (root mean square error), ossia il valore della deviazione standard della differenza tra la posizione dei GCP prima della correzione e la loro posizione corretta; in questa sede si è deciso di ritenere accettabili errori fino ad un valore massimo di tre pixel (che per quote di volo di circa 50 metri corrisponde circa a 20 cm).

Considerato che il posizionamento dei GCP risulta essere l'operazione più onerosa in termini di tempo, si reputa che la soluzione adottata in questo studio (10 coppie di punti omologhi) sia un buon compromesso per ottenere dei risultati accettabili (RSM inferiore a tre pixel) in un tempo di elaborazione ragionevole (pochi minuti di elaborazione per ciascun frame). Nello specifico, la scelta del numero di GCP da utilizzare per tutti i frame è stata effettuata georeferenziando un frame campione con un numero crescente di GCP, da cinque a venti; in particolare, si è osservato (figure 46, 47, 48 e 49) che il valore più basso di RSM si è verificato quando si sono utilizzati proprio dieci GCP. In ogni caso, qualora si voglia ulteriormente migliorare la bontà della georeferenziazione è possibile, a discapito di un notevole dispendio di tempo, spostare i GCP che presentano degli errori di posizionamento fino a quando non si migliora l'accuratezza. Così facendo, sempre per lo stesso frame, è stato possibile arrivare ad un RSM di 1.031 pixel (circa sette centimetri) ma impiegando più di venti minuti per completare la procedura di georeferenziazione.



Fig. 46. Visualizzazione dei punti di controllo (GCP) utilizzati ed indicazione dell'accuratezza complessiva (RSM) per la georeferenziazione di un frame campione: 5 GCP utilizzati.

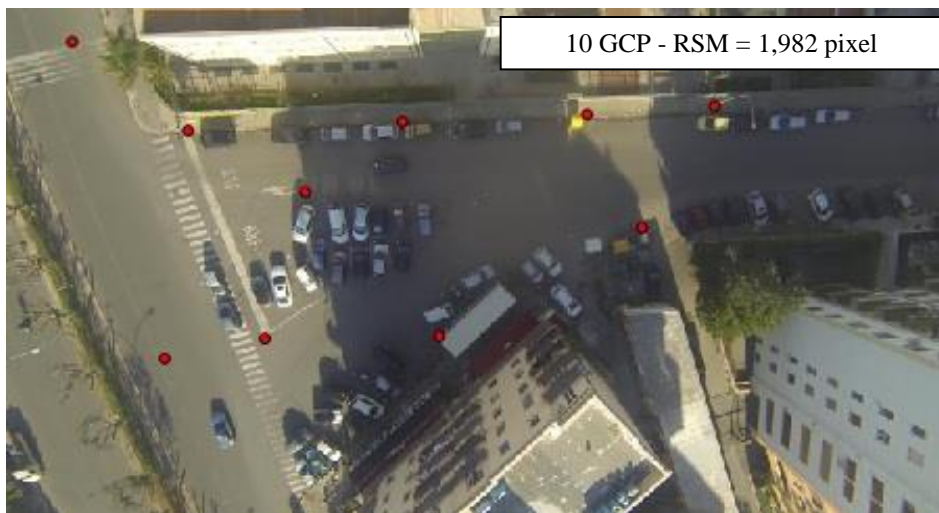


Fig. 47. Visualizzazione dei punti di controllo (GCP) utilizzati ed indicazione dell'accuratezza complessiva (RSM) per la georeferenziazione di un frame campione: 10 GCP utilizzati.

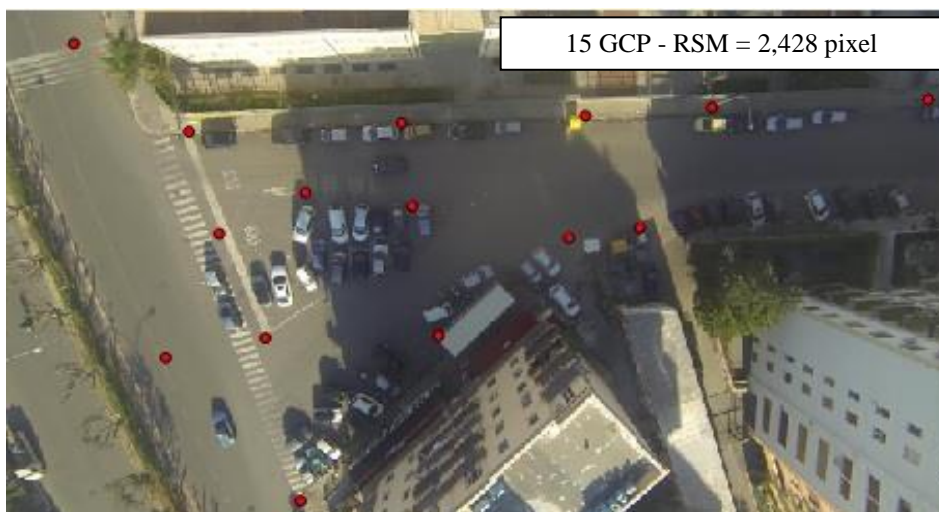


Fig. 48. Visualizzazione dei punti di controllo (GCP) utilizzati ed indicazione dell'accuratezza complessiva (RSM) per la georeferenziazione di un frame campione: 15 GCP utilizzati.



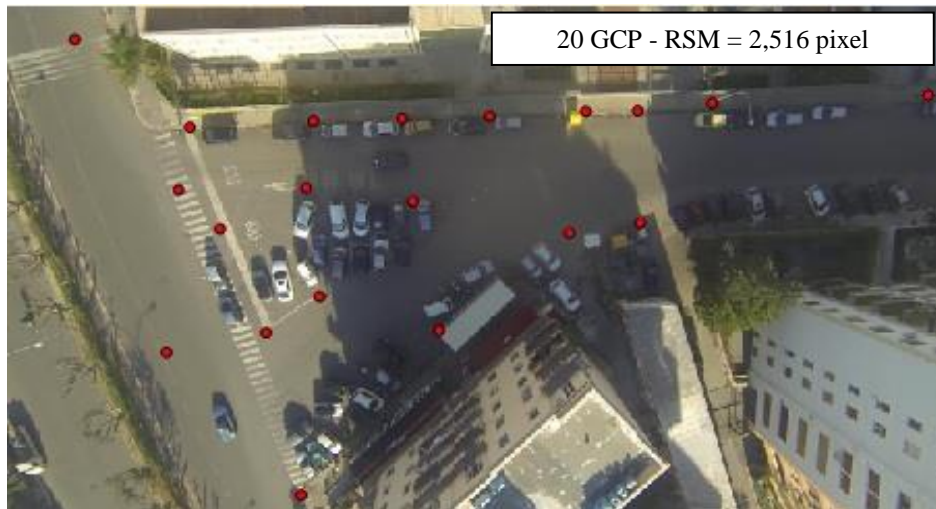


Fig. 49. Visualizzazione dei punti di controllo (GCP) utilizzati ed indicazione dell'accuratezza complessiva (RSM) per la georeferenziazione di un frame campione: 20 GCP utilizzati.

La penultima operazione da effettuare per concludere il processamento del video è tracciamento nel tempo del veicolo sonda. Anche tale operazione, condotta in ambiente GIS attraverso l'editing di un file vettoriale di tipo puntale, deve essere condotta avendo cura di individuare la posizione del punto di controllo posizionato sul veicolo con la maggiore precisione possibile (figura 50).



Fig. 50. Visualizzazione dei punti di controllo (GCP) utilizzati ed indicazione dell'accuratezza complessiva (RSM) per la georeferenziazione di un frame campione: 20 GCP utilizzati.

Infine, occorre effettuare la valutazione dell'accuratezza dei risultati ottenuti attraverso la comparazione tra i valori di velocità misurati dal GPS differenziale ( $V_{GPS}$ ) installato a bordo del veicolo sonda e quelli ricavati dall'elaborazione del video ( $V_{UAV}$ ), sempre relativi il veicolo sonda. Per fare questo occorre ricavare i valori di velocità misurati dal

GPS differenziale attraverso l'utilizzo di uno specifico software con il quale è possibile applicare ai dati acquisiti in pieno campo la correzione di tipo di differenziale via GSM da una rete di stazioni permanenti dislocata nel territorio. Una volta ottenuti i dati GPS corretti è possibile importarli in ambiente GIS e, tra le diverse informazioni acquisite, vi sono le coordinate X ed Y, la precisione orizzontale, l'orario ed il GDOP, un indice per descrivere il contributo della configurazione geometrica dei satelliti all'accuratezza del posizionamento.

Una volta implementati in ambiente GIS i risultati ottenuti di entrambe le metodologie di rilievo è possibile effettuare il confronto tra i valori di velocità misurati dal GPS differenziale ( $V_{GPS}$ ) posizionato sul veicolo sonda e quelli ricavati a partire dalla elaborazione delle immagini acquisite da UAV ( $V_{UAV}$ ). Attraverso la realizzazione di un diagramma di dispersione è possibile ricavare la relazione matematica che lega le velocità tra loro e valutare il coefficiente  $R^2$  che, per garantire elevati livelli di accuratezza, si deve attestare a essere prossimo all'unità.

### **6.4.3 Stima delle grandezze cinematiche di interesse**

L'ultima fase della metodologia di rilevamento dei flussi di traffico consiste nel ricavare in ambiente GIS la posizione di ogni veicolo inquadrato nel tempo e, pertanto, ricavarne la traiettoria, la velocità e l'accelerazione. Una volta conosciute tali informazioni è possibile:

- stimare i principali parametri di flusso macroscopici, ossia il flusso, la velocità media e la densità di concentrazione;
- contare i veicoli lungo un'arteria o in prossimità di intersezioni;
- determinare della matrice Origine-Destinazione;
- stimare i principali parametri di flusso microscopico, come ad esempio i gap critici, i tempi di immissione (gap acceptance) ed i cambi di corsia;
- effettuare la classificazione dei veicoli in transito;
- individuare eventuali infrazioni al Codice della Strada.

Inoltre, è possibile utilizzare tale tecnica di monitoraggio per realizzare specifiche ricerche sul traffico finalizzate ad esempio allo sviluppo di metodi/modelli di simulazione del traffico o al miglioramento delle condizioni di sicurezza degli utenti deboli della strada (pedoni e ciclisti).

## **CAPITOLO 7**

### **Applicazioni sperimentali realizzate e principali risultati**

#### **7.1 Introduzione**

In quest'ultimo capitolo vengono descritte le applicazioni sperimentali effettuate e sono presentati i principali risultati ottenuti applicando la metodologia di descritta nel capitolo precedente quali ad esempio la stima di alcune grandezze cinematiche, utili per la taratura dei modelli di simulazione del traffico sia di tipo macroscopico che microscopico, e la valutazione del "reale" comportamento di guida degli utenti della strada, i quali non accorgendosi di fatto della presenza della strumentazione utilizzata per effettuare il monitoraggio non risultano essere condizionati in alcun modo durante la guida.

Infine, vengono presentati alcuni risultati che possono essere ottenuti con minori oneri computazionali quali ad esempio la realizzazione di matrice Origine/Destinazione e l'individuazione di alcuni comportamenti scorretti durante la guida.

#### **7.2 Rilievi in pieno campo**

Durante l'attività di ricerca condotta dallo scrivente sono state realizzate quattro campagne di raccolta di dati in pieno campo, tutte realizzate prima dell'entrata in vigore del Regolamento "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto" (30 aprile 2014), in cui si sono acquisiti dei video in qualità HD dall'alto da uno dei due SAPR precedentemente descritti

(paragrafo 6.2). La loro realizzazione è stata effettuata da una squadra di volo composta da tre operatori messa a disposizione da E. Lab, uno degli Spin-Off Accademici della Università degli Studi di Palermo, in alcuni tratti di strada opportunamente selezionati in cui è stato possibile garantire un elevato standard di sicurezza per la realizzazione dei voli. Il primo rilievo è stato effettuato a Palermo in una porzione di via Ernesto Basile, una strada a doppia carreggiata con due corsie per ogni direzione di percorrenza che è caratterizzata da elevati flussi di traffico in quanto, oltre ad essere in prossimità della Cittadella Universitaria, costituisce una delle vie di accesso al centro della città. Il rilievo è stato realizzato in un tratto in uscita dal centro urbano, ossia verso la circonvallazione, in un tratto di strada privo di immissioni ed uscite modo da poter verificare le condizioni richieste dai modelli di macro-simulazione del traffico. La figura sottostante riporta la scena inquadrata dalla videocamera posizionata sul drone in volo ad una quota di circa 30 m durante la realizzazione delle attività effettuate durante i rilievi in campo.



Figura 51. – Scena inquadrata dal SAPR in volo ad una quota di circa 30 m relativa la prima applicazione sperimentale condotta a Palermo lungo la via Ernesto Basile.

Il secondo rilievo, anch'esso realizzato a Palermo, è stato effettuato ad una quota di circa 70 m in prossimità dell'intersezione a raso non semaforizzata regolata dal segnale di STOP tra la via Ugo Solarino, strada secondaria a servizio di una zona a prevalente carattere residenziale, e la via Ernesto Basile, strada principale oggetto anche del primo rilievo. L'immagine che segue è uno dei frame acquisiti dall'alto dal SAPR in volo in prossimità del tratto di strada investigato.



Figura 52. Scena inquadrata dal SAPR in volo ad una quota di circa 70 m relativa la seconda applicazione sperimentale condotta a Palermo in prossimità dell'intersezione a raso non semaforizzata tra la via Ugo Solarino e la via Ernesto Basile.

Gli ultimi due rilievi, invece, sono stati realizzati a Milazzo (ME). Nel terzo si è analizzato il tratto finale dell'asse viario che collega lo svincolo autostradale con il centro abitato; in particolare, l'immissione nel sistema stradale urbano è costituita da un'intersezione a raso non semaforizzata regolamentata da un segnale di STOP (figura 53).

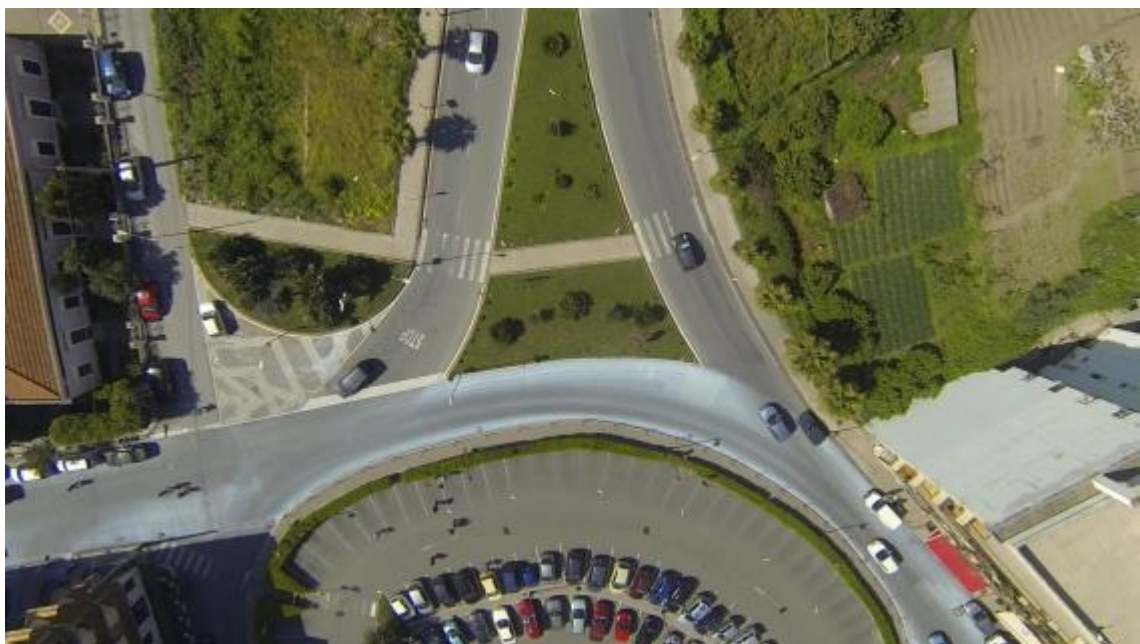


Figura 53. Scena inquadrata dal SAPR in volo ad una quota di circa 70 m relativa la terza applicazione sperimentale condotta a Milazzo (ME) in prossimità dell'intersezione a raso non semaforizzata tra l'asse viario e la piazza XXV Aprile

L'ultimo rilievo, infine, è stato realizzato in una rotatoria lungo la statale SS113 in un'area a prevalente vocazione commerciale sita nei pressi dello svincolo autostradale (figura 54).



Fig. 54 - Scena inquadrata dal SAPR in volo ad una quota di circa 70 m relativa la quarta applicazione sperimentale condotta a Milazzo (ME) nella rotatoria lungo la SS113 in prossimità delle via Firenze e viale Avv. Federico Fulci..

La tabella sottostante, oltre ad indicare l'eventuale presenza del veicolo sonda equipaggiato con un GPS di tipo differenziale durante la realizzazione del rilievo in pieno campo, riportare le principali informazioni relative ai voli effettuati ossia la quota di volo determinata a partire dal punto di decollo del SAPR , il numero di voli realizzati, il tempo complessivo di volo ed numero di frame estratti.

Rilievo	Veicolo sonda	Quota di volo	Numero di voli	Tempo volo totale	Numero di frame estratti
Via Basile (Palermo)	no	~ 30 m	3	16' 30''	570
Via Solarino (Palermo)	si	~ 70 m	5	28' 26''	1446
Asse Viario (Milazzo)	si	~ 70 m	5	27' 55''	1395
Rotatoria (Milazzo)	si	~ 70 m	3	17' 05''	786

Tabella 7 – Principali informazioni relative i voli effettuati durante le applicazioni sperimentali realizzate ed indicazione della presenza del veicolo sonda equipaggiato con un GPS differenziale.

### 7.3 Principali risultati ottenuti

Nei sotto-paragrafi seguenti si riportano alcuni risultati ottenuti a partire dall'elaborazione dai video acquisiti da un SAPR in volo attraverso l'applicazione della procedura di monitoraggio del traffico messa a punto nel corso dell'attività di ricerca condotta dallo scrivente. Nello specifico, dopo aver esposto alcuni risultati ottenuti relativi il tracciamento dei veicoli e l'individuazione delle traiettorie, si riportano quelli relativi il flusso e la velocità media ricavati durante la prima campagna di misura. A seguire vi sono una comparazione tra i profili di velocità del veicolo sonda ricavati sia da GPS che da SPAR e dei risultati relativi la tematica del "gap acceptance". Infine, vengono presentati alcuni risultati ottenuti senza realizzare il processamento rigoroso dei video, ossia una matrice Origine/Destinazione ed l'individuazione di comportamenti scorretti alla guida.

#### 7.3.1 Tracciamento dei veicoli ed individuazione delle traiettorie

L'individuazione delle posizioni dei veicoli nel tempo, come descritto in precedenza, è un'operazione effettuata utilizzando un software GIS open source utilizzando i frame precedentemente georiferiti. Al fine di minimizzare gli errori nella successiva stima delle grandezze di interesse tale operazione è stata effettuata avendo cura di individuare nel tempo sempre lo stesso punto nel veicolo come ad esempio la parte centrale del vetro anteriore o della copertura; nel caso di tracciamento del veicolo sonda si è proceduto all'individuazione del punto di controllo posizionato sul cofano anteriore mentre.

La figura seguente riporta a titolo esemplificativo 10 frame georiferiti in cui è stata individuata la posizione del veicolo sonda.



Figura 55 (a) - Tracciamento in ambiente GIS del veicolo sonda (in particolare del punto di controllo posizionato sul cofano anteriore) effettuato attraverso l'utilizzo di 10 frame georiferiti

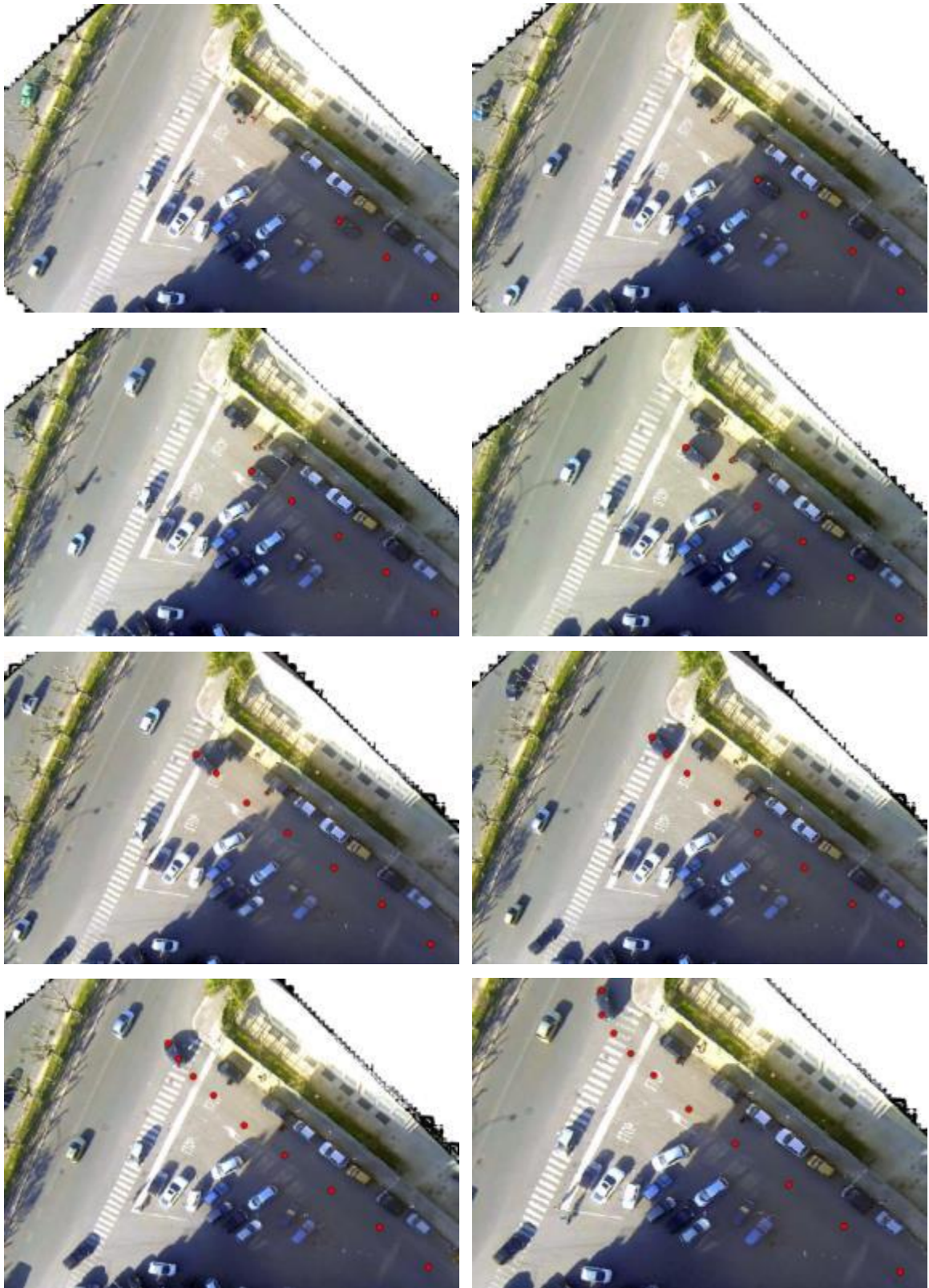


Figura 55 (b) - Tracciamento in ambiente GIS del veicolo sonda (in particolare del punto di controllo posizionato sul cofano anteriore) effettuato attraverso l'utilizzo di 10 frame georiferiti.

A seguire, invece, si riportano le traiettorie ricavate di sei veicoli che sono stati ripresi per un intervallo di tempo di 16 secondi durante la realizzazione del terzo rilievo. Per ciascun



veicolo è stata indicata in figura sia la traiettoria seguita che la posizione dello stesso in ogni frame analizzato.



Figura 56 - Tracciamento in ambiente GIS delle traiettorie di dei veicoli utilizzando dei frame precedentemente georiferiti (WGS 84 / UTM zone 33N).

### 7.3.2 Stima del flusso e della velocità media

La conoscenza dei valori del flusso e della velocità media sono di fondamentale importanza per la modellazione macroscopica del traffico e, in questa sede, sono stati ricavati con un'elevata accuratezza attraverso l'elaborazione di un video acquisito dall'alto. La figura 57 riporta, a titolo di esempio, tre frame acquisiti durante un rilievo

effettuato in un'ora di punta (13:00 – 14:00) di un giorno feriale medio di un tratto lungo circa 50 metri di una carreggiata di via Ernesto Basile (Palermo) in cui è possibile notare che la velocità di uno dei due veicoli (quello identificato con il rettangolo bianco) è molto maggiore rispetto all'altro (in verde). La tabella 8, invece, oltre a riportare i valori della velocità media e di quella massima determinati durante il processamento dei video acquisiti durante il rilievo, indica anche il valore del flusso orario dei veicoli ricavato a partire dalle informazioni contenute nei video acquisiti, la cui durata è circa 13 minuti.



Figura 57 - Tracciamento in ambiente GIS delle traiettorie di alcuni veicoli

Rilievo	Flusso [veic./h]	V <sub>media</sub> [km/h]	V <sub>massima</sub> [km/h]
Automobili	1852	35,0	65,0
Autobus / Mezzi pesanti	44	32,0	48,0
Motocicli	532	37,0	68,0

Tabella 8 – Valori del flusso, della velocità media e di quella massima relativi un giorno feriale medio ricavati a partire da un rilievo di durata pari a 15 minuti relativo ad una delle due carreggiate di via Ernesto Basile.

### 7.3.3 Comparazione tra i profili di velocità del veicolo sonda

Nei rilievi in cui è stato utilizzato anche un veicolo sonda dotato di GPS differenziale si è proceduto ad realizzare la comparazione tra i profili di velocità ricavati dalle due differenti tipologie di strumentazioni utilizzate; inoltre, per valutare l'accuratezza ed il livello di affidabilità della procedura proposta si è realizzato anche un diagramma di dispersione tra i valori di velocità misurati dal GPS differenziale posizionato sul veicolo sonda (asse x) e quelli ricavati a partire dalla elaborazione delle immagini acquisite da UAV (asse y). La relazione ottenuta, riportata nella figura sottostante, dimostra che la velocità stimata dall'elaborazione del video acquisito dall'alto è pressoché la stessa di quella misurata tramite l'utilizzo di un GPS differenziale posizionato sul veicolo sonda; inoltre, il livello di attendibilità nella stima dei valori di velocità è molto elevato visto il valore prossimo ad 1 del coefficiente  $R^2$ .

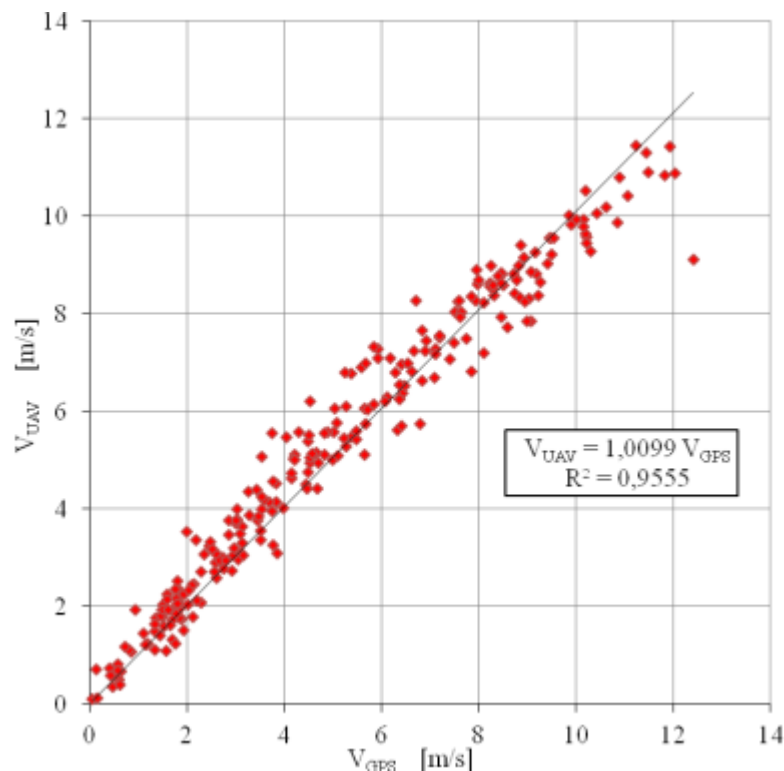


Figura 58 - Diagramma di dispersione relativa una delle prove sperimentali effettuate dei valori di velocità misurati da GPS differenziale (asse x) e quelli ricavati a partire dall'elaborazione delle immagini acquisite da UAV (asse y).

Le figure seguenti, invece, si riportano per l'intersezione a raso non semaforizzata regolata da segnale di STOP tra la via Solarino e la via Basile, alcuni profili di velocità ricavati delle due differenti tipologie di strumentazioni utilizzate; ciascuna coppia di profilo presenta minimi scostamenti tra le due differenti metodologie utilizzate.

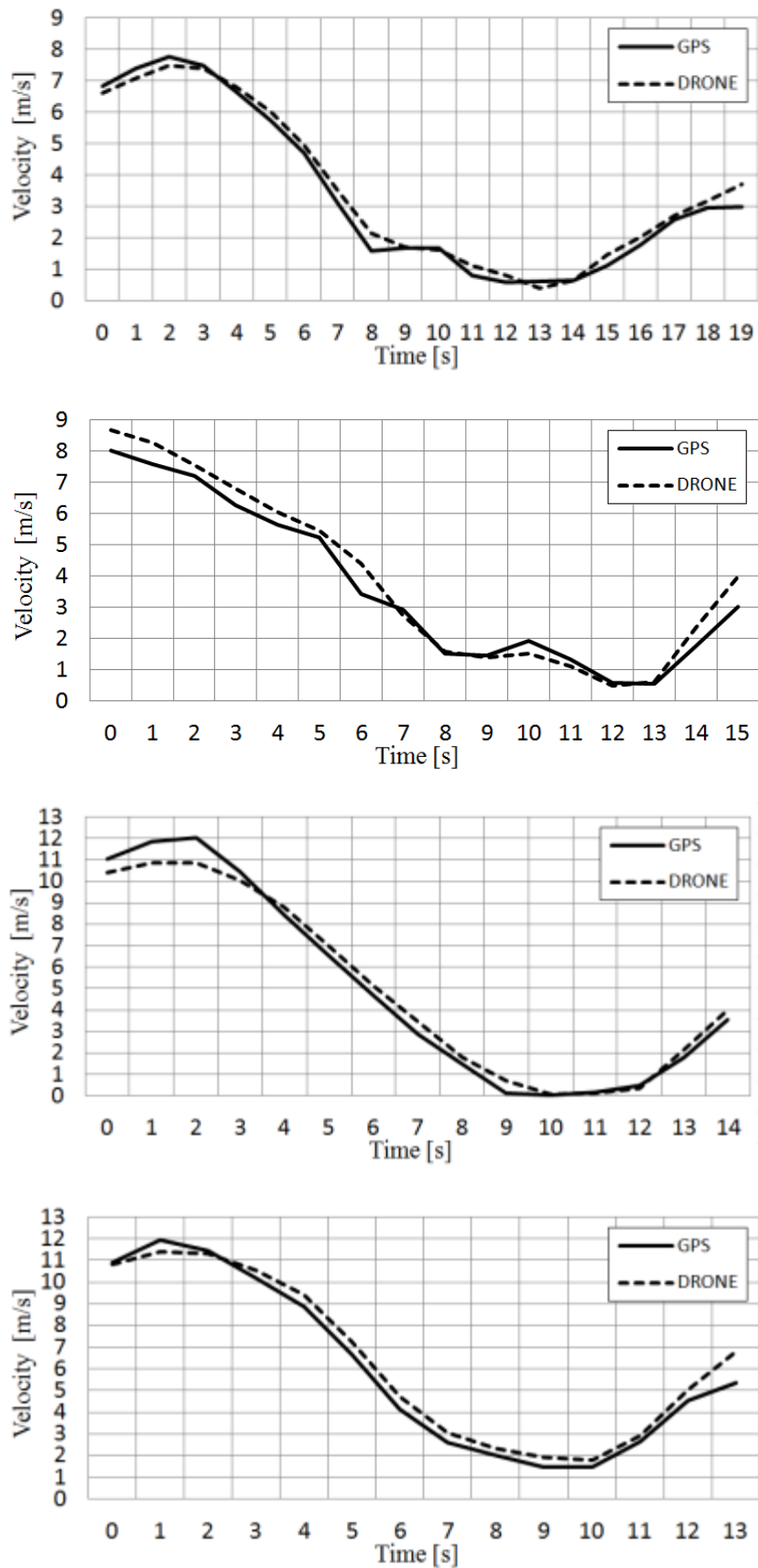


Figura 59 (a) - Visualizzazione di sei coppie di profili di velocità ricavate dalle due differenti tipologie di strumentazioni utilizzate; in particolare, quello acquisito da GPS differenziale è riportato con un linea continuo mentre quello ottenuto da UAV è tratteggiato.

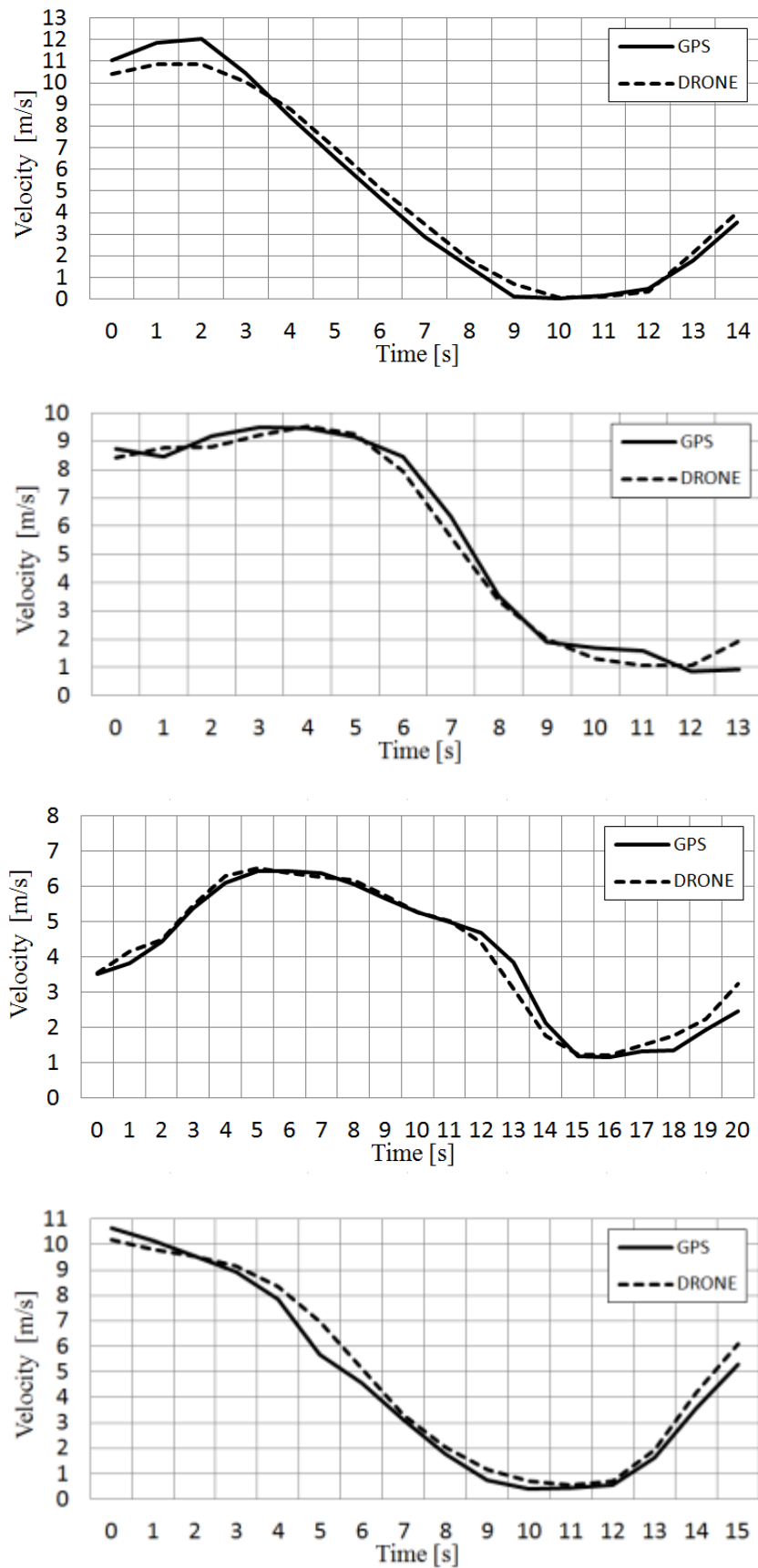


Figura 59 (b) - Visualizzazione di sei coppie di profili di velocità ricavate dalle due differenti tipologie di strumentazioni utilizzate; in particolare, quello acquisito da GPS differenziale è riportato con un linea continuo mentre quello ottenuto da UAV è tratteggiato.

La figura 60 mostra l'andamento dei profili di velocità di una coppia di veicoli che hanno effettuato una manovra di immissione in un incrocio: in blu è indicato il leader mentre in rosso il veicolo follower.

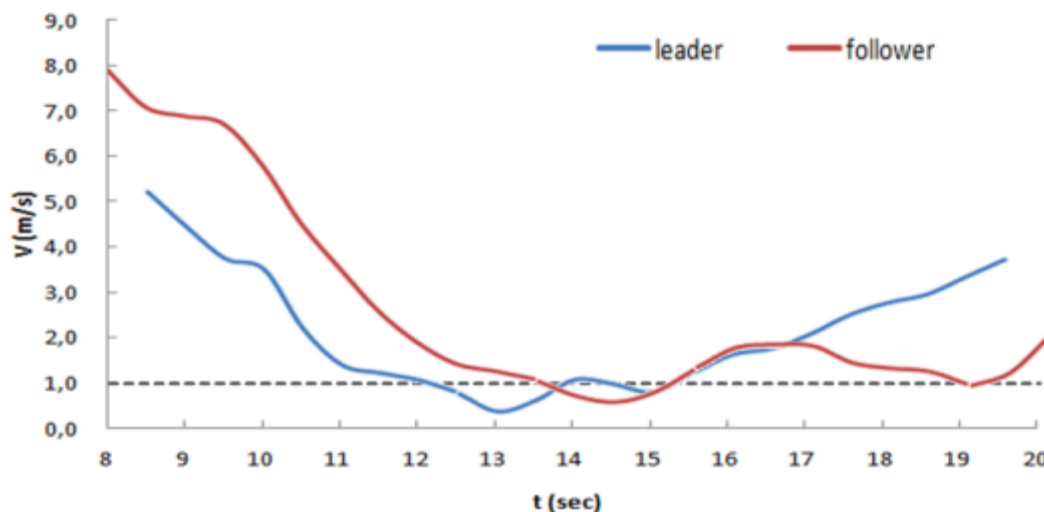


Figura 60 - Andamento dei profili di velocità di una coppia di veicoli che hanno effettuato una manovra di immissione in un incrocio: in blu è indicato il leader mentre in rosso il veicolo follower.

Analizzando i loro andamenti di velocità è possibile constatare che il veicolo leader giunge nei pressi dell'incrocio in corrispondenza del tredicesimo secondo (velocità quasi nulla), poi dopo due secondi si ferma nuovamente ed infine si immette nella corrente di traffico principale (fase di accelerazione); il veicolo follower, invece, all'inizio decelera con la stessa intensità del leader (fino al secondo 12), poi accorgendosi che il veicolo che lo precede occupa ancora l'incrocio avanza con una decelerazione minore (fino al secondo 15), a questo punto cerca di immettersi (velocità crescente tra i secondi 15 e 17) ma è costretto nuovamente quasi a fermarsi (19esimo secondo) prima di completare la fase di immissione.

### 7.3.4 Valutazione del gap acceptance

La valutazione del gap acceptance è un aspetto che riveste particolare importanza nella modellazione del traffico a scala microscopica in quanto l'attendibilità dei risultati ottenibili sono strettamente dipendenti alla veridicità dei parametri utilizzati per la modellazione del traffico e per la previsione della sua evoluzione nel tempo. Durante

alcune applicazioni sperimentali realizzate si è avuto modo di analizzare il “reale” comportamento di guida degli autisti durante l’avvicinamento all’incrocio e l’immissione nel nuovo flusso veicolare, sia esso quello di una strada principale o di una rotonda.

La figura 62 mostra due differenti frame relativi l’immissione dei due veicoli il cui andamento di velocità è stato riportato nella figura precedente. Nello specifico, a sinistra vi è il veicolo leader che prima di immettersi del flusso principale aspetta il passaggio di due macchine (gap rifiutati) e poi si immette accettando un gap di 4,5 secondi; a destra, invece, vi è il veicolo follower che avendo già aspettato qualche secondo che il veicolo che lo precedeva liberasse l’incrocio, molto probabilmente aveva “fretta” di immettersi ed, infatti, dopo aver rifiutato un gap ne accetta un altro di 2,0 sec.



Veicolo leader		Veicolo follower	
			
Tempo di attesa	4,5 s	Tempo di attesa	2,0 s
Gap rifiutati	2	Gap rifiutati	1
Gap critico	4,0 s	Gap critico	2,0 s

Figura 61 – Frame relativi gli istanti di immissione del veicolo leader (parte sinistra) e di quello follower (parte destra) il cui andamento di velocità è stato riportato nella figura precedente.

Tale tipologia di comportamento, ossia il fatto che gli autisti che si avvicinano ad un’immissione dopo aver aspettato almeno una macchina che li precede sono propensi ad accettare gap critici di minore durata prima di completare la loro manovra, è stata riscontrata altre volte nel corso delle analisi effettuate in questa sede. La figura 63, riporta un altro esempio di tale comportamento in cui i veicoli si immettono in una rotonda.

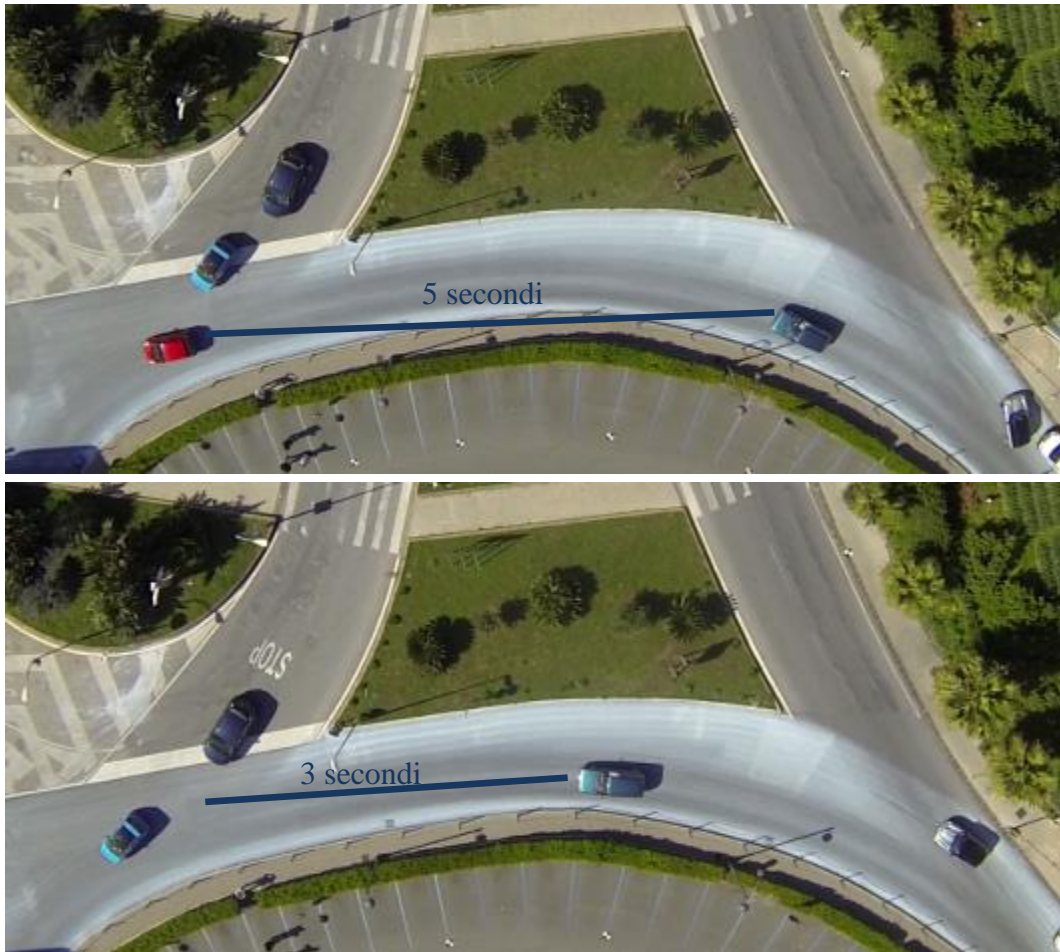


Figura 62 – Frame relativi gli istanti di immissione del veicolo leader (parte superiore della figura) e di quello follower (parte inferiore) il cui a è stato indicato il gap accettato per completare la manovra di immissione alla rotonda.

Ulteriori valutazioni sul reale comportamento di guida degli autisti sono state effettuate considerando le sole autovetture che si sono immesse nelle due intersezioni a raso regolamentate dal segnale STOP. Da tale analisi si è deciso di escludere sia il veicolo sonda, in quanto il proprio autista sapendo di essere “controllato” potrebbe aver modificato anche se involontariamente il proprio comportamento di guida, che le altre tipologie di veicoli quali i mezzi pesanti, i bus ed i ciclomotori perché durante la realizzazione dei rilievi ne sono transitati molto pochi. Sono stati analizzati 133 veicoli, sono stati suddivisi in tre tipologie di veicoli (isolati, leader e follower) e, per ciascuno di essi, si sono determinati il numero di gap rifiutati, il gap accettato ed il tempo di attesa all’incrocio, ossia l’intervallo di tempo che l’autista è stato fermo in prossimità dello stop ad aspettare il momento per immettersi nel flusso principale. In tabella 9 si è riportato per ciascuna tipologia di veicoli analizzati il gap accettato suddiviso in tre intervalli: meno di tre secondi, da tre a sei secondi e più di sei secondi.



Tipologie di veicoli	Gap Acceptance [s]		
	< 3	3– 6	> 6
Isolato	16	20	8
Leader	13	15	6
Follower	24	21	10

Tabella 9 – Suddivisione in tre classi dei valori del gap accettato per ciascuna tipologia di veicolo (isolato, leader e follower) analizzato.

A seguire sono riportati due diagrammi, il primo riferito ai veicoli isolati o leader ed il secondo relativo i veicoli follower, in cui sono stati individuati in funzione dei tempi di attesa e del numero di gap rifiutati i seguenti tre differenti stili di guida:

- aggressivo, in cui il numero di gap rifiutati è generalmente maggiore del tempo di attesa;
- neutrale, in cui i tempi di attesa sono simili al numero di gap respinto;
- prudente, in il tempo di attesa è molto maggiore del numero di gap rifiutati.

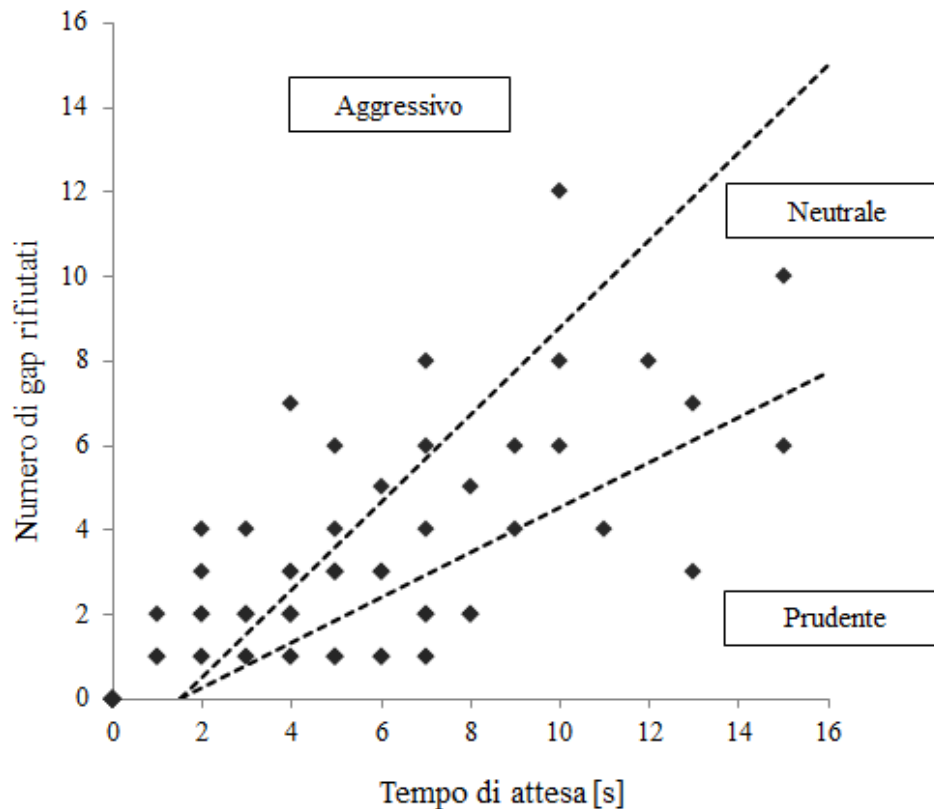


Figura 63 – Classificazione della tipologia di comportamento dei conducenti ottenuta comparando il tempo di attesa ed il numero di gap rifiutati prima di completare la fase di immissione nella corrente di traffico principale – Caso di veicoli isolati o leader

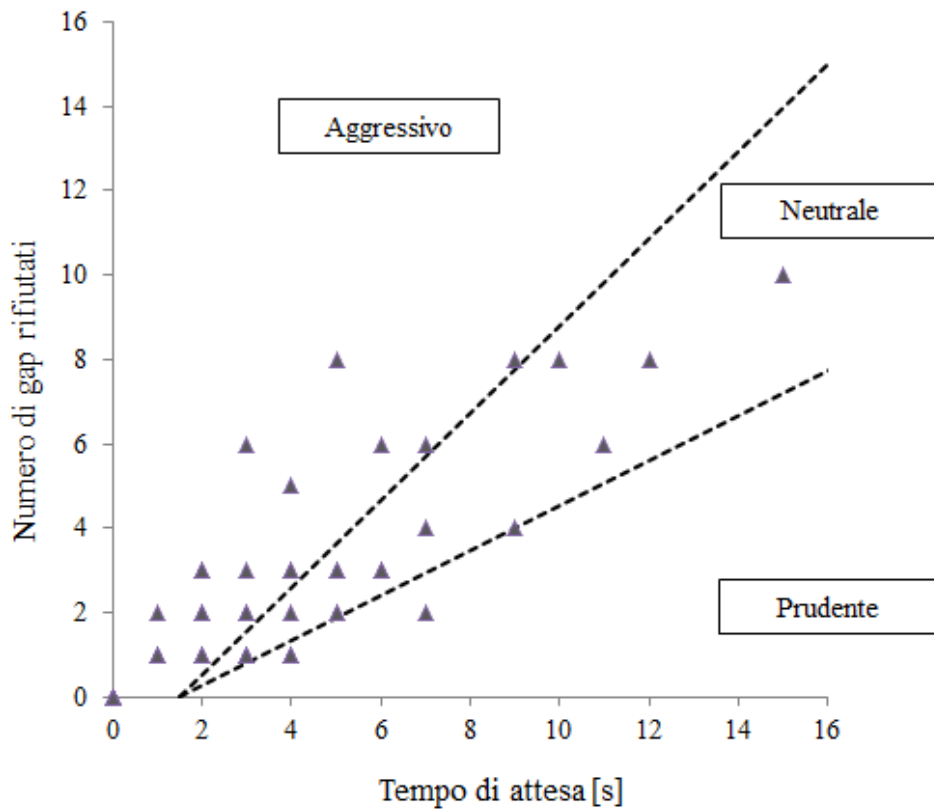


Figura 64 – Classificazione della tipologia di comportamento dei conducenti ottenuta comparando il tempo di attesa ed il numero di gap rifiutati prima di completare la fase di immissione nella corrente di traffico principale – Caso di veicoli follower

Comparando i risultati ottenuti nei due diagrammi è possibile constatare che gli autisti che si avvicinano all'incrocio dopo aver aspettato almeno una macchina che li precede risultano essere meno prudenti rispetto agli autisti di veicoli isolati o leader. La figura 65, riporta due frame relativi l'istante di immissione nella corrente di traffico principale di due autisti con differenti tipologie di comportamento.



Figura 65 - Frame relativi l'istante di immissione nella corrente di traffico principale di due autisti con differenti tipologie di comportamento: a sinistra un autista con comportamento aggressivo, a destra un altro con comportamento di tipo neutrale.

### 7.3.5 Determinazione della matrice O/D

La matrice Origine/Destinazione è un risultato che può essere ottenuto visionando semplicemente le registrazioni effettuate dal SAPR in volo senza realizzare la procedura di elaborazione dei video descritta nel capitolo 6.

La figura sottostante riporta la matrice O/D ricavata a partire dall'elaborazione di 15 minuti di video acquisito in modo nadirale sopra la rotatoria investigata a Milazzo in un giorno feriale medio tra le ore 14:30 e le ore 15:30; nello specifico, facendo riferimento alla precedente figura 54, i quattro tratti di strada che confluiscono nella rotatoria sono stati identificati con le seguenti lettere di riferimento:

- A: tratto della SS113 compreso tra lo svincolo autostradale e la rotatoria(tratto di strada orizzontale nella parte sinistra della figura);
- B: viabilità di accesso all'aera a forte vocazione commerciale (parte bassa della figura);
- C: continuazione del tratto A, ossia della SS113 (tratto di strada orizzontale nella parte destra);
- D: viabilità di accesso ad un'area a carattere prevalentemente residenziale (parte alta della figura).

	A	B	C	D
A	5	3	131	59
B	3	0	4	19
C	129	11	7	13
D	78	7	26	0

Figura 66 - Matrice O/D ricavata a partire dall'elaborazione di 15 minuti di video acquisito in modo nadirale sopra la rotatoria investigata a Milazzo

Analizzando i risultati ottenuti è possibile osservare che i maggiori flussi di veicoli sono presenti lungo la statale SS113 (dalla direzione A a quella C, e viceversa), quelli relativi l'area commerciale (direzione B) sono di modesta entità molto probabilmente a causa dell'orario in cui sono stati acquisiti i video dall'alto mentre, quelli relativi l'area

residenziale (direzione C) presentano dei flussi significativi sia in ingresso che in uscita; infine, soltanto pochi veicoli in transito lungo la SS115 fruttano la rotatoria per realizzare un'inversione di marcia.

### 7.3.6 Individuazione di comportamenti scorretti alla guida

Ulteriore risultato che può essere ottenuto visionando, anche in tempo reale, i video acquisiti dall'alto può essere quello di individuare eventuali comportamenti scorretti alla guida, quali ad esempio quelli riportati nelle due figure seguenti: nella figura 67 il veicolo contornato da un rettangolo rosso non rispetta il segnale di stop immettendosi nell'incrocio prima degli altri veicoli che lo precedono; nella figura 68 vi è un doppio comportamento scorretto in quanto un pedone attraversa la strada statale lontano dalle strisce pedonali e, subito dopo, lo scooter in cui sale come passeggero fa inversione di marcia in corrispondenza delle strisce pedonali.



Figura 67 – Comportamento scorretto di un veicolo che non rispetta il segnale di STOP.



Figura 68 – Comportamento scorretto di un pedone che attraversa in prossimità di una rotatoria e di uno scooter che effettua un'inversione di marcia sulle strisce pedonali.

## CONCLUSIONI

La presente tesi, redatta dallo scrivente a conclusione delle attività di ricerche condotte durante il triennio 2012-2015 nell'ambito del XXVI° Ciclo del Dottorato di Ricerca in "Energia"- indirizzo "Tecnica ed Economia dei Trasporti", è stata finalizzata all'analisi ed all'individuazione di tecniche innovative di monitoraggio del traffico che, se utilizzate ad integrazione di quelle più tradizionali e affermate sia dal punto di vista scientifico sia metodologico, hanno il compito di fornire e mantenere aggiornati i dati sulla consistenza dei flussi di traffico e raccogliere informazioni sui comportamenti di guida dei conducenti. Nel corso dell'attività di ricerca, oltre ad introdurre il problema della gestione del traffico, sono stati esaminati i Sistemi di Trasporto Intelligente, i modelli matematici di simulazione del traffico e gli aspetti legati alla progettazione di un sistema di monitoraggio dei flussi di traffico. Successivamente, si sono descritte le tecniche di rilevamento dei dati del traffico di tipo tradizionale, quelle basate sull'uso della tecnologia per la gestione ed il trattamento delle informazioni ed anche le tipologie di informazioni reperibili dal WEB che, se pur fornendo solamente delle informazioni di tipo qualitativo, possono essere di grande aiuto per la comprensione e l'evoluzione legate alla dinamica del traffico.

La fase sperimentale della ricerca è stata finalizzata a verificare se i Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto, strumentazione già ampiamente utilizzata da alcuni anni in altri settori

dell'ingegneria civile ed applicabile in molti contesti anche di tipo urbano, possono essere utilizzati anche come un valido strumento di monitoraggio del traffico. Dopo averne descritto le principali caratteristiche e peculiarità, si sono brevemente trattati gli aspetti legislativi che ne regolamentano l'uso; a seguire, sono stati illustrati i due differenti droni utilizzati per la realizzazione delle attività sperimentale e la metodologia messa a punto per effettuare il rilevamento dei flussi di traffico veicolare attraverso l'acquisizione di un video acquisito da un drone in volo.

Alla luce dei risultati ottenuti si ritiene che i SAPR possono essere impiegati sia per realizzare il monitoraggio delle grandezze cinematiche del traffico che per rilevare altre tipologie di informazioni, quali ad esempio l'individuazione di comportamenti di guida scorretti o la modalità con cui gli utenti deboli della strada (pedoni e ciclisti) interagiscono con gli altri mezzi e con il sistema infrastrutturale. Nello specifico, viste le caratteristiche e le peculiarità che li contraddistinguono, si reputa che i droni di piccole dimensioni possono essere utilizzati nel rispetto delle normative vigenti in molti contesti applicativi garantendo ottimi risultati. Inoltre, i SAPR a parere dello scrivente sono da assimilare alle strumentazioni di monitoraggio del traffico di tipo non sono invasive e, visto che un SAPR in volo è difficilmente individuabile dagli utenti della strada che sono impegnati nella guida dei loro mezzi, risultano essere anche uno strumento che non influenza il comportamento di guida dei conducenti. Di contro, però, il loro utilizzo risulta essere condizionato da alcuni fattori limitanti quali quelli climatici (vento, pioggia, campi elettromagnetici, etc.), quelli dovuti alla presenza di ostacoli fisici (palazzi, canyon urbani, etc.), quelli strumentali (modesta autonomia delle batteria, low payload, etc.) e quelli legati alla normativa (possibile presenze di "no-fly" zone).

Per quanto riguarda la metodologia sviluppata per l'elaborazione ed interpretazione dei video acquisiti da un SAPR in volo si ritiene che, pur prevedendo la realizzazione di alcune operazioni manuali quali la georeferenziazione dei frame estratti in cui l'esperienza dell'operatore riveste un ruolo determinante nell'accuratezza del risultato finale, essa riesca a caratterizzare e descrivere in modo accurato le reali condizioni del traffico. Sono da auspicare, come sviluppi futuri dell'attività di ricerca effettuata dallo scrivente, la realizzazione di procedure informatiche finalizzate al trattamento automatico ed oggettivo dei video acquisiti da drone e l'integrazione dei risultati delle diverse tipologie di strumentazioni utilizzate per effettuare il monitoraggio del traffico in strumenti di facile

accesso a tutti gli utenti della strada, quali ad esempio dei portali internet dedicati o degli applicativi per smartphone e tablet.

Inoltre, è verosimile pensare che, nel prossimo futuro, saranno disponibili in commercio anche dei nuovi SAPR con caratteristiche più performanti ed aventi maggiori standard di sicurezza in modo tale da poter utilizzare tali strumentazioni in ambiti professionali nel completo rispetto delle normative, anch'esse suscettibili di ulteriori evoluzioni sia a livello nazionale che comunitario. Un'ultima considerazione riguarda proprio la normativa italiana che, essendo entrata in vigore durante la realizzazione della presente attività di ricerca, ha indotto una parte degli operatori del settore a sospendere del tutto le loro attività di volo per circa un anno, ossia fintantoché non c'è stata la possibilità di adeguarsi al regolamento ENAC.