



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sistema di monitoraggio e previsione della mobilità veicolare per l'integrazione tra la rete della illuminazione pubblica e la rete della mobilità

M.G. Messina, G. Valenti, F. Carapellucci

G. Fusco, C. Colombaroni, A. Gemma, G. Ciccarelli, S. Lo Sardo



Report RdS/2011/330

SISTEMA DI MONITORAGGIO E PREVISIONE DELLA MOBILITÀ VEICOLARE PER
L'INTEGRAZIONE TRA LA RETE DELLA ILLUMINAZIONE PUBBLICA E LA RETE DELLA
MOBILITÀ

M.G. Messina, G. Valenti, F. Carapellucci (ENEA)

G. Fusco, C. Colombaroni, A. Gemma, G. Ciccarelli, S. Lo Sardo (CTL, Università di
Roma La Sapienza)

Novembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia

Progetto: Tecnologie "smart" per l'integrazione della illuminazione pubblica con altre reti
di servizi energetici e loro ottimizzazione

Responsabile Progetto: Mauro Annunziato, ENEA

INDICE

1	PREMESSA.....	9
2	INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA	10
2.1	CONTEGGIO VEICOLARE E MISURE DI TRAFFICO	13
2.2	MONITORAGGIO DEL TRAFFICO CON RETI DI SENSORI FISSI	15
2.2.1	<i>Dispositivi di conteggio degli assi veicolari.....</i>	<i>15</i>
2.3	DISPOSITIVI DI RILEVAMENTO DEI VEICOLI.....	2
2.3.1	<i>Spire induttive.....</i>	<i>2</i>
2.3.2	<i>Sensori a raggi infrarossi (passivi).....</i>	<i>4</i>
2.4	DISPOSITIVI DI CONTEGGIO E MISURA DELLA VELOCITÀ	6
2.4.1	<i>Sensori Magnetici.....</i>	<i>6</i>
2.4.2	<i>Sensori radar a microonde.....</i>	<i>9</i>
2.4.3	<i>Sensori laser a raggi infrarossi di tipo attivo</i>	<i>12</i>
2.4.4	<i>Sensori sonici e ultrasuonici</i>	<i>14</i>
2.5	SENSORI VIDEO CON ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI.....	18
2.5.2	<i>Sistemi di sensori integrati (multitecnologia)</i>	<i>24</i>
2.6	MONITORAGGIO CON SENSORI MOBILI	25
2.6.1	<i>Schema di monitoraggio del traffico con sensori mobili.....</i>	<i>25</i>
2.6.2	<i>Organizzazione del sistema</i>	<i>27</i>
2.6.3	<i>Localizzazione dei veicoli sonda.....</i>	<i>28</i>
2.6.4	<i>Metodi di comunicazione</i>	<i>30</i>
2.7	STRATEGIE DI AGGIORNAMENTO DEL SISTEMA CENTRALE.....	31
2.8	PRESTAZIONI DEL SISTEMA.....	34
2.8.1	<i>Stima della velocità d'arco</i>	<i>34</i>
2.8.2	<i>Valutazione delle prestazioni.....</i>	<i>36</i>
2.8.3	<i>Confronto con i rilevatori fissi.....</i>	<i>38</i>
2.9	LIMITI E BENEFICI.....	39
2.9.1	<i>Un esempio di mix ottimale di rilevatori fissi/mobili.....</i>	<i>40</i>
3	ANALISI DEI MODELLI DI TRAFFICO	43
3.1	CRITERI DI CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI.....	43
3.2	REGIMI DI CIRCOLAZIONE.....	46
3.2.1	<i>Correlazione tra i regimi di circolazione.....</i>	<i>48</i>
3.2.2	<i>Forma e caratteristiche del diagramma fondamentale</i>	<i>50</i>
3.3	CALIBRAZIONE SPERIMENTALE.....	53
3.3.1	<i>Comportamento instabile: fenomeno di isteresi.....</i>	<i>55</i>
3.4	MODELLI DI DEFLUSSO DEL PRIMO ORDINE	55
3.4.1	<i>L'approccio continuo.....</i>	<i>55</i>
3.5	DERIVAZIONE DEL MODELLO DI LWR	57
3.6	RAPPRESENTAZIONE DISCRETA	62
3.7	PROPRIETÀ E LIMITI DEL MODELLO.....	63
3.8	ESTENSIONI DEL MODELLO	64

4	IL MODELLO DI DEFLUSSO DEL SECOND'ORDINE	66
4.1	DERIVAZIONE DEL MODELLO	66
4.2	FORMULAZIONE DISCRETA.....	67
4.3	CORREZIONE EMPIRICA	68
4.4	MODALITÀ DI APPLICAZIONE DEL MODELLO.....	70
4.4.1	<i>Livelli di aggregazione delle variabili.....</i>	<i>70</i>
4.5	SPECIFICHE DEL SOFTWARE PROTOTIPALE.....	73
4.5.1	<i>Architettura del software.....</i>	<i>73</i>
4.5.2	<i>Procedura di elaborazione dei dati.....</i>	<i>74</i>
4.5.3	<i>Simulazione del deflusso.....</i>	<i>74</i>
4.5.4	<i>Procedura di aggiornamento delle previsioni.....</i>	<i>75</i>
5	IL CASO DI TEST.....	76
5.1	SCELTA DEL CASO DI STUDIO E DATI DISPONIBILI	76
5.2	DATI DISPONIBILI	76
5.3	ANALISI DEI DATI.....	82
5.3.1	<i>Profili di flusso, velocità e densità veicolare.....</i>	<i>82</i>
5.4	INDIVIDUAZIONE DI SITUAZIONI ANOMALE	86
5.5	CALIBRAZIONE DELLE CURVE DI DEFLUSSO ALLO STATO STAZIONARIO.....	88
5.6	CALIBRAZIONE DEL MODELLO DINAMICO	90
5.6.1	<i>Formulazione del modello ed analisi delle modalità di applicazione.....</i>	<i>90</i>
5.6.2	<i>Esemplificazione dei risultati e calibrazione del modello.....</i>	<i>92</i>
5.7	APPLICAZIONE IN PREVISIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO	96
5.7.1	<i>Modalità di applicazione in previsione.....</i>	<i>96</i>
5.7.2	<i>Validazione del modello in previsione.....</i>	<i>99</i>
5.7.3	<i>Analisi delle fonti di errore.....</i>	<i>100</i>
6	CONCLUSIONI.....	103
7	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	105

Indice Figure

Figura 1 – Schematizzazione del conteggio in una sezione (a sinistra) ed in un due sezioni consecutive (a destra).	14
Figura 2 – Disposizione di un tubo pneumatico per il monitoraggio del traffico.	16
Figura 3 – Pannello frontale di un contatore per tubi pneumatici Trax-III prodotto dalla JAMAR Technologies, Horsham, Pennsylvania, USA.	16
Figura 4 – Profilo e sezione di un cavo triboelettrico per il monitoraggio del traffico.	2
Figura 5 – Profilo e sezione di un cavo triboelettrico per il monitoraggio del traffico.	3
Figura 6 – Installazione di una piastra piezoelettrica al quarzo.	3
Figura 7 – Direzione della corrente ed orientamento del campo magnetico.	2
Figura 8 – Schema di funzionamento elettromagnetico della coppia spira-veicolo.	4
Figura 9 – Sensori infrarossi passivi Eltec 833 and 842.	6
Figura 10 – Principio di funzionamento dei sensori magnetici.	7
Figura 11 – A sinistra: un sensore magnetico passivo 3M Microloop Probes Model 701 e a destra un sensore magnetico G-2 Nu-Metrics Groundhog (a destra).	7
Figura 12 – Un sensore sonda biassiale Safetran Magnetic Sensor 231E, da inserire al di sotto della pavimentazione o nell'intradosso di viadotti (a destra).	8
Figura 13 – Sensore magnetodinamico Nu-Metrics, da inserire al di sopra della pavimentazione, utilizzando per protezione un rivestimento rigido (a destra).	9
Figura 14 – Sensori radar a micro-onde ad effetto Doppler (a sinistra, il sensore TC20) ed a rilevazione di presenza (a destra il sensore Naztec 150LX per la rilevazione di una singola corsia).	10
Figura 15 – Principio fisico dell'effetto Doppler (a sinistra) e modalità di applicazione dei sensori di monitoraggio con micro-onde radar (a destra).	11
Figura 16 – Principio di rilevazione della presenza di un veicoli con sensore radar	12
Figura 17 – Dispositivo di rilevazione della velocità SODI Autovelox 105 SE.	13
Figura 18 – Dispositivo di rilevazione dei veicoli e della velocità Efkon TOM 2000.	13
Figura 19 – Profili veicolari ottenibili con scansione laser a raggi infrarossi.	14
Figura 20 – Microwave Sensors TC-30C, Single Lane Model (a sinistra) e Novax ELA 155 Two-Lane Model (a destra)	15
Figura 21 – Principio di trasmissione e riflessione di impulsi ultrasonici sulla superficie stradale in presenza o in assenza di un veicolo.	16
Figura 22 – Sensore IRD SmartSonic Single Lane Model (a sinistra) e SmarTek SAS-1 Multiple Lane Model	17

Figura 23 – Architettura e principio di funzionamento dei sensori video per elaborazione delle immagini	18
Figura 24 – Posizionamento di telecamera con illuminatore ad infrarossi (a sinistra) e principio di rilevamento video con elaborazione delle immagini mediante spire virtuali (a destra).	19
Figura 25 – Degradamento delle prestazioni di riconoscimento dei veicoli con sensori video al variare delle condizioni di luce.....	21
Figura 26 – Posizionamento di telecamera con illuminatore ad infrarossi (a sinistra) e principio di rilevamento video con elaborazione delle immagini mediante spire virtuali (a destra).	22
Figura 27 – Estensione del campo di rilevamento in funzione del distanziamento spaziale V_d dei veicoli e dell'altezza della telecamera nel caso delle autovetture (a sinistra) e di veicoli commerciali (a destra).	22
Figura 28 – Installazione del sistema ASIM TT266 e schema di integrazione delle 3 diverse tecnologie utilizzate (a destra).	25
Figura 29 – Componenti e interazioni di un sistema FCD	26
Figura 30 – Schematizzazione del sistema di monitoraggio e controllo	27
Figura 31 – Funzionamento del GPS differenziale	29
Figura 32 – Andamento dell'errore quadratico medio di velocità in funzione della quota di veicoli sonda.....	37
Figura 33 – Andamento dell'errore quadratico medio del tempo di percorrenza in funzione della quota di veicoli sonda	38
Figura 34 – Configurazione della strumentazione di rilievo considerata nel progetto ATMO dell'Università Tecnologica di Deft	40
Figura 35 – Accuratezza e robustezza del modello sviluppato nell'ambito del progetto ATMO	42
Figura 36 (sinistra) - Curve di deflusso sperimentali e localizzazione dei detector.....	47
Figura 37 (destra) - Traiettorie dei veicoli dedotte da fotografie aeree.....	47
Figura 38 – Punti sperimentali e derivazione del modello di Greenshields velocità-densità.	48
Figura 39 – Andamento tipico di un diagramma fondamentale flusso-densità.....	51
Figura 40 – Andamento tipico di un diagramma fondamentale velocità-flusso.....	53
Figura 41 – Un esempio di plot delle relazioni tra le caratteristiche macroscopiche del deflusso.....	54
Figura 42– Tipica forma “lambda inversa” di un diagramma fondamentale	55

Figura 43 – Uso del diagramma fondamentale q-k: la pendenza del raggio vettore a fornisce la velocità media della corrente ($v=q/k$), la pendenza della tangente b rappresenta la velocità dell'onda ($w=dq/dk$)	58
Figura 44 – Rappresentazione grafica della propagazione di uno stato di traffico secondo la teoria delle onde cinematiche	59
Figura 45 – Uso del diagramma fondamentale per prevedere le condizioni locali in prossimità di un'onda d'urto.....	60
Figura 46– Metodo grafico di costruzione delle onde d'urto nel passaggio da una corrente più fluida a monte (A) ad una più densa a valle (B).....	61
Figura 47– Smaltimento di una coda a un semaforo mediante il modello LWR	62
Figura 48 – Influenza dei flussi di rampa	68
Figura 49 – Modellizzazione di un tronco autostradale	69
Figura 50– Architettura del software.....	74
Figura 51– Grafo della rete stradale della Provincia di Roma	76
Figura 52 – Prestazioni della rete di trasporto della provincia di Roma: lunghezza e velocità media degli spostamenti nelle diverse fasce orarie	77
Figura 53– Prestazioni della rete di trasporto della provincia di Roma: indici delle percorrenze orarie e chilometriche	78
Figura 54– Analisi delle prestazioni della rete di trasporto della provincia di Roma: tempi medi di percorrenza nelle diverse fasce orarie delle giornate feriali e festive	79
Figura 55 – Grafo del GRA e dati GPS	80
Figura 56 – Andamento di flusso, velocità e densità utilizzando dati di veicoli sonda	83
Figura 57 – Andamento di flusso, velocità e densità utilizzando dati di rilevatori fissi	83
Figura 58– Confronto risultati rilevatori fissi/rilevatori mobili.....	84
Figura 59 – Effetti della normalizzazione dei flussi.....	85
Figura 60 – Curve sperimentali di deflusso.....	86
Figura 61 – Intervallo desiderato nel piano densità-flusso.....	87
Figura 62 – Rappresentazione della caduta di velocità	88
Figura 63– Risultati della calibrazione delle curve di deflusso.....	89
Figura 64 – Dettaglio dell'arteria utilizzata come caso di studio	91
Figura 65– Schematizzazione dell'arteria per il modello di simulazione del deflusso stradale	92
Figura 66– Output del modello.....	93
Figura 67 – Influenza dei flussi di rampa (diagramma in alto) e della costante di anticipazione (diagramma in basso) sugli output del modello	94

Figura 68– Risultato della calibrazione	95
Figura 69– Calibrazione del modello	95
Figura 70– Arteria di studio: in rosso sono evidenziate le posizioni dei sensori che forniscono i dati di input (a sinistra) e di output, utilizzati per la validazione (a destra)	96
Figura 71– Output del modello di previsione del traffico: andamento temporale del flusso in 4 diverse sezioni	98
Figura 72– Output del modello di previsione del traffico: andamento temporale della velocità in 4 diverse sezioni	98
Figura 73– Validazione del modello: confronto tra flussi osservati e flussi previsti in uscita in corrispondenza di dati di input non filtrati	99
Figura 74 – Andamento nel tempo dei flussi su una rampa di ingresso (in alto) e una di uscita (in basso) utilizzati per la previsione (curva in celeste) e osservati (curva in viola) .	101
Figura 75 – Andamento dei flussi totali giornalieri su tutte le rampe di ingresso (in alto) e di uscita (in basso) utilizzati per la previsione (curva in celeste) e osservati (curva in viola) .	102

1 Premessa

Il focus delle attività di ricerca riguarda lo studio e sviluppo di un sistema prototipale di simulazione e previsione a breve termine dello stato del traffico veicolare sulle arterie stradali urbane.

Requisito fondamentale del sistema è di operare in tempo reale a partire dai dati rilevati da una rete diffusa di sensori di traffico posizionati sui pali per l'illuminazione stradale e/o degli impianti semaforici.

L'uso della rete elettrica di illuminazione stradale per il monitoraggio del traffico veicolare sulla rete consente di attivare due tipologie complementari di sinergia:

- da una parte, adattare l'intensità dell'illuminazione alle caratteristiche del traffico, così da ridurre i consumi energetici, adattando dinamicamente i livelli di illuminazione ai requisiti normativi legati al flusso veicolare;
- dall'altra, utilizzare la rete di illuminazione come scheletro di supporto fisico e alla trasmissione delle informazioni del sistema di monitoraggio, così da realizzare una rete di sensori eccezionalmente densa e connessa.

Aspetto innovativo della ricerca è lo sviluppo di modelli e tecniche di analisi delle prestazioni del traffico stradale e di previsione nell'immediato futuro della sua evoluzione, specificatamente concepiti per una rete di sensori ad elevata densità.

La ricerca ha come obiettivo finale quello di aumentare la conoscenza della reale dinamica del traffico stradale nelle aree urbane e di contribuire alla realizzazione del controllo ottimo del sistema mobilità attraverso un uso più efficiente e integrato dei dispositivi e delle apparecchiature di regolazione (semafori, blocco accessi, pannelli a messaggio variabile, sistemi di navigazione assistita, ecc.).

L'applicazione coordinata e corretta delle moderne tecnologie di regolazione del traffico, in grado di condizionare il comportamento dei viaggiatori e, conseguentemente, di modificare la distribuzione nel tempo e nello spazio del traffico, consentirà miglioramenti nelle prestazioni del sistema mobilità nelle aree urbane in termini di riduzione della congestione, dei consumi energetici e delle emissioni di inquinanti ambientali.

La ricerca è stata articolata nelle seguenti tre fasi:

Fase 1 – Inquadramento del problema

Fase 2 – Formulazione del modello

Fase 3 – Sviluppo prototipale e validazione della procedura

La presente relazione descrive i risultati delle attività svolte nelle tre fasi di ricerca.

2 Inquadramento del problema

La conoscenza aggiornata delle condizioni di traffico della rete è condizione essenziale dei sistemi di trasporto intelligenti, che sono stati definiti come sistemi adattivi in grado di modificare le proprie caratteristiche operative in funzione delle condizioni esterne, per il perseguimento di determinati obiettivi.

Il sistema di acquisizione dei dati è composto dal sistema di monitoraggio del traffico, che rileva alcune delle variabili descrittive del flusso di veicoli o di utenti presenti nel sistema, da sistemi di monitoraggio ambientale e della via e, infine, dal sistema di localizzazione individuale dei veicoli, singoli o di flotte. La distinzione tra questi sistemi non è solo tecnologica ma è soprattutto funzionale. I sistemi di monitoraggio del traffico servono per rilevare il numero complessivo di veicoli o di utenti transitati in una sezione o in un elemento della rete stradale; i sistemi di localizzazione servono per determinare la posizione di un veicolo o utente sulla rete (rispetto ad una posizione iniziale-sistemi di posizionamento- o rispetto alla rete stradale-sistemi di localizzazione propriamente detti); i sistemi di identificazione servono per riconoscere la presenza di un dato veicolo o utente, appartenente all'insieme di utenti del sistema precedentemente identificati e codificati. I sistemi di identificazione vengono utilizzati quindi per l'identificazione di veicoli abilitati al passaggio in zone a traffico limitato, per l'identificazione dei colli in un sistema di distribuzione delle merci, per l'esazione del pedaggio autostradale o del titolo di viaggio nei sistemi di trasporto pubblico. Sono anche usati per il monitoraggio di una flotta di veicoli viaggianti esclusivamente su un sottoinsieme noto degli archi della rete, rilevandone il passaggio in punti determinati (radio-boe o radiofari), come nel caso di una flotta di autobus adibiti al servizio di linea. L'identificazione dei passaggi veicolari consente di stimare i tempi di percorrenza della rete tracciando i veicoli identificati (sistema usato da alcune aziende di trasporto pubblico per alimentare i sistemi di informazione alle fermate e, in campo stradale, dalla Società Autostrade tracciando gli utenti del Telepass su alcune boe posizionate in punti intermedi dei tronchi autostradali o in Gran Bretagna dalla società TrafficMaster tracciando alcuni utenti identificati mediante un sistema automatico di lettura della targa). Il sistema di identificazione è stato recentemente introdotto anche in campo ferroviario (sistema Eurobalise), per integrare il sistema di blocco automatico introdotto molti decenni prima.

Il sistema di monitoraggio ambientale e della via consente di rilevare, da una parte, le condizioni esterne rilevanti ai fini della sicurezza (rilevazione dell'eventuale presenza di ghiaccio, neve o acqua sulla strada, di nebbia o fumo che riducono la visibilità) e, dall'altra, gli effetti del sistema dei trasporti sull'ambiente circostante (concentrazioni di inquinanti, emissioni di rumore), così da poter così le misure di regolazione appropriate per ridurre l'impatto.

L'importanza di un sistema di monitoraggio è riconosciuta dal Nuovo Codice della Strada, che prescrive (Art.227) che "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 di cui all'articolo 226,

comma 1, e per la individuazione dei punti di maggiore congestione del traffico”. Il primo obiettivo stabilito per il sistema di monitoraggio è diretto quindi all’assolvimento degli obblighi di raccolta statistica dei dati di traffico delle principali arterie stradali nazionali, assunti dai Paesi aderenti alle Nazioni Unite nel 1956. Il censimento del traffico non richiede necessariamente un sistema automatico di rilevazione ed anzi è stato condotto finora mediante conteggi manuali in postazioni fisse della rete stradale principale, secondo regole e cadenze aggiornate in norme successive e non sempre coerenti tra loro¹. Le risoluzioni ONU (UN/ECE TRANS/WP.6/AC.2) hanno però progressivamente semplificato la classificazione veicolare, in modo da consentire l’uso di dispositivi di monitoraggio automatico. La tabella 3-1 mostra la corrispondenza tra la suddivisione in 7 classi prevista dalle norme CEE e la classificazione ONU UN/ECE del 1999, attualmente seguita dall’ANAS per il censimento del traffico.

Tabella 1 Classificazioni veicolari adottate dall’ANAS prescritte dalle norme internazionali ONU e UE

Classe	Descrizione	EEC 1108/70	UN/ECE TRANS/WP.6/AC.2
0	Veicoli a motore con non più di tre ruote	7	A
1	Veicoli con non più di 9 posti	1	B
2	Autocarri di peso massimo non superiore a 3 t	2	B
3	Autocarri di peso massimo superiore a 3 t	3	C
4	Autocarri con rimorchio	4	C
5	Autocarri con semi-rimorchio	5	C
6	Autobus	6	D

L’installazione di dispositivi di conteggio automatico nelle sezioni di censimento consente di estendere l’obiettivo dall’individuazione dei punti di congestione alla sua riduzione, sfruttando il monitoraggio per applicare strumenti di informazione e regolazione in tempo reale. Il monitoraggio del traffico può rispondere peraltro a molteplici altre esigenze, rispondenti alla conoscenza e alla riduzione delle altre esternalità del traffico, in particolare la sicurezza e l’inquinamento atmosferico ed acustico.

Il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ha emanato nel 2002 le “Linee guida per la progettazione dei sistemi di monitoraggio del traffico”, che forniscono i criteri per il

¹ In particolare, la norma europea EEC/1108/70 fissa 7 classi veicolari ed una cadenza annuale, mentre risoluzione ONU UN/ECE TRANS/WP.6/AC.2 indicava una cadenza quinquennale e 10 classi veicolari (successivamente ridotte a 9 nel 1973, a 5 nel 1994, a 4 nel 1999, prevedendo infine la possibilità di usare su alcune sezioni una suddivisione in 2 sole classi: veicoli leggeri e pesanti).

dimensionamento del sistema, la scelta delle tecnologie da utilizzare e le modalità di esecuzione del monitoraggio che, per scopi diversi dal controllo in tempo reale, può essere effettuato con rilevazioni periodiche su alcuni elementi della rete utilizzando dispositivi di conteggio mobili o il conteggio manuale.

Un sistema di monitoraggio automatico è costituito in linea di principio dai seguenti componenti:

- un *sensore*, dispositivo costituito da un materiale sensibile ad una grandezza descrittiva del fenomeno, 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*, 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:

- 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.

I sensori sensibili al peso rilevano il passaggio di ciascun asse (e a seconda del principio fisico utilizzato ne misurano il peso) e non il passaggio del veicolo in quanto tale. 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).

Alla rassegna dei sensori con rilevamento con sensori in posizioni fisse si deve aggiungere il rilevamento mediante sensori mobili, oggi in notevole espansione grazie alla diffusione dei sistemi di comunicazione ed identificazione mobile, dalla localizzazione satellitare alla comunicazione cellulare.

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.

Nel capitolo vengono esposti i principi di conteggio, comuni alle diverse tecnologie ed attuabili anche da un operatore umano, per poi esaminare le diverse tipologie di sensori.

2.1 Conteggio veicolare e misure di traffico

I dispositivi di monitoraggio del traffico eseguono delle misure di conteggio dei veicoli transitati in una sezione o presenti in un'area di rilevazione. A partire da queste misure è possibile effettuare delle stime delle variabili del deflusso veicolare ed applicare quindi i modelli di analisi o di regolazione del traffico.

Un dispositivo di conteggio veicolare, posizionato in corrispondenza di una sezione stradale, conta il numero n di veicoli transitati, analogamente a quanto farebbe un singolo osservatore a lato strada, e fornisce quindi una misura del flusso q in un periodo di tempo T :

$$q = \frac{n}{T}$$

Due rilevazioni in due sezioni consecutive, effettuate con due sensori collegati ad uno stesso dispositivo di elaborazione dotato di un cronometro, consentono di effettuare anche una misura della velocità, analogamente a quanto farebbero due osservatori posti alle estremità di un tronco di lunghezza L , dotati di cronometri.

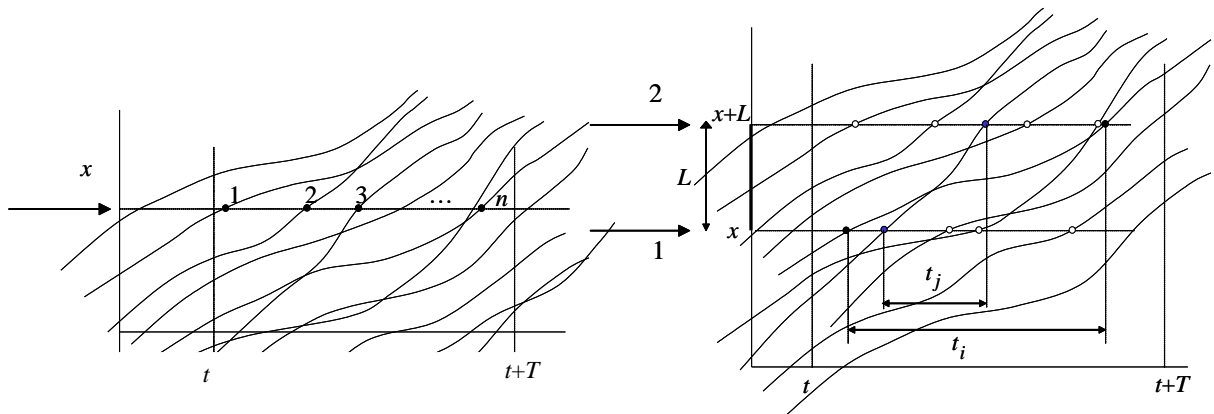


Figura 1 – Schematizzazione del conteggio in una sezione (a sinistra) ed in un due sezioni consecutive (a destra).

L'intervallo di tempo tra il passaggio del generico veicolo i nella prima e nella seconda sezione fornisce il suo tempo di percorrenza:

$$t_i = t_{2i} - t_{1i}$$

Il tempo totale di permanenza veicoli nell'area di rilevazione (ovvero nel tronco di lunghezza L) è la somma dei singoli tempi di percorrenza dei veicoli entrati ed usciti nel tempo T :

$$\sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n t_{2i} - t_{1i} = \sum_{i=1}^n t_{2i} - \sum_{i=1}^n t_{1i}$$

Il rapporto tra il tempo di permanenza dei veicoli ed il tempo T di osservazione è detto *tasso di occupazione* ed è una delle principali grandezze fornite dai rilevatori non puntuali:

$$\bar{t} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n t_i$$

Il tempo totale di permanenza veicoli nell'area di rilevazione consente di determinare la velocità media spaziale dei veicoli rilevati²:

$$v_s = \frac{L}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{L}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i}}$$

Applicando l'equazione di stato, e trascurando la variazione delle velocità nel tempo, si ottiene una stima approssimata della densità veicolare come rapporto tra il tasso medio di occupazione e la lunghezza dell'area di rilevazione³:

² L'utilità della misura della velocità media spaziale sta nel fatto che nell'equazione di stato per una corrente veicolare non omogenea la velocità è calcolata come media nello spazio e non nel tempo.

$$k = \frac{q}{v_s} = \frac{n}{T} \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n t_i \right) \frac{1}{L} = \frac{\bar{\tau}}{L}$$

2.2 Monitoraggio del traffico con reti di sensori fissi

2.2.1 DISPOSITIVI DI CONTEGGIO DEGLI ASSI VEICOLARI

I dispositivi per il conteggio degli assi veicolari sfruttano, come detto, la deformazione indotta sul dispositivo dal peso delle ruote del veicolo. I dispositivi più semplici, tubi pneumatici o cavi piezoelettrici, sono dispositivi di solo conteggio poiché consentono di rilevare il solo passaggio. I dispositivi più avanzati consentono di misurare anche il peso di ciascun asse e, collegati con un opportuno modulo di elaborazione, di stimare il peso del veicolo. I dispositivi citati utilizzano diversi tipi di sensore che sfruttano fenomeni fisici diversi: la deformazione meccanica (tubi pneumatici e celle di carico), l'elettrizzazione per strofinio (cavi triboelettrici), la capacità elettrica (piastre capacitive), l'effetto piezoelettrico (sensori piezoelettrici).

2.2.1.1 Tubi pneumatici

I tubi pneumatici sono tra i primi e più semplici dispositivi di conteggio del traffico. Il sensore è costituito da un tubo di gomma fissato sulla strada, in posizione trasversale rispetto al senso di marcia dei veicoli (Figura 2). Quando la ruota di un veicolo transita sul tubo di gomma lo deforma e genera al suo interno un'onda di pressione, che attiva un interruttore a membrana, che funge da rilevatore, posto su un'estremità del tubo. L'interruttore è inserito in un circuito elettrico alimentato da una batteria che viene chiuso ogni volta che l'interruttore viene attivato. Il segnale viene quindi rilevato da un contatore, che effettua il conteggio dei veicoli facendo corrispondere ad ogni coppia di impulsi un'unità di vettura equivalente. I dispositivi di conteggio più moderni, analoghi a quelli utilizzati per le più diffuse spire ad induzione magnetica, sono predisposti per analizzare i segnali provenienti da più tubi, posti sulle due semi-carreggiate o accoppiati in successione su una o più corsie di strade a senso unico o a doppio senso, per stimare la velocità e disaggregare i conteggi per corsia (Figura 3).

³ La proporzionalità diretta tra occupazione e densità consente di scrivere gli algoritmi di stima dello stato della rete (ad esempio, gli algoritmi di riconoscimento automatico degli incidenti California e Payne) e di regolazione del traffico (ad esempio, la tecnica di controllo degli accessi Alinea) direttamente in termini di occupazione invece che di densità.



Figura 2 – Disposizione di un tubo pneumatico per il monitoraggio del traffico.



Figura 3 – Pannello frontale di un contatore per tubi pneumatici Trax-III prodotto dalla JAMAR Technologies, Horsham, Pennsylvania, USA.

I dispositivi di conteggio con tubi pneumatici hanno il vantaggio dell'economicità e della semplicità di installazione e rimozione. Sono stati molto usati in passato, ed in parte lo sono ancora oggi, per monitoraggio periodici, poiché hanno un'autonomia di alcuni giorni.

Presentano però anche rilevanti svantaggi: un'elevata imprecisione di conteggio nel caso di flussi elevati, con errori anche superiori al 20% (MIT, 2002), all'impossibilità di ricavare i dati del transito dei veicoli multiassiali, al rischio di rottura meccanica del tubo ad opera soprattutto dei mezzi pesanti con il conseguente pericolo di distacco violento del tubo dalla pavimentazione stradale.

2.2.1.2 Cavi triboelettrici

I cavi triboelettrici utilizzano il principio di elettrizzazione per strofinio⁴, proprio di alcuni materiali dielettrici, per rilevare il passaggio della ruota di un veicolo. Il sensore è un cavo coassiale costituito da un conduttore centrale (in fili di acciaio) circondato da materiale dielettrico, che a sua volta è racchiuso da un anello esterno di fili di acciaio intrecciati, protetto da un robusto rivestimento di plastica esterno. 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.

⁴ L'effetto di elettrizzazione per strofinio è detto effetto triboelettrico, dal greco τριβω (strofinio) (Cfr. Sette, 1982, pag.4).

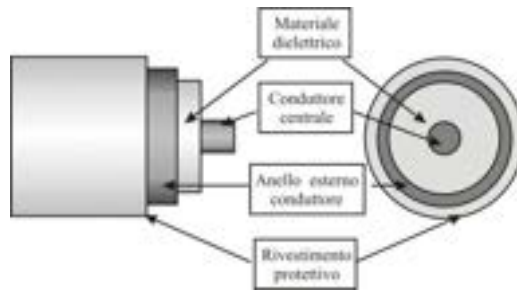


Figura 4 – Profilo e sezione di un cavo triboelettrico per il monitoraggio del traffico.

La disposizione e l'uso di questo tipo di dispositivi è molto simile a quello dei tubi pneumatici: il cavo triboelettrico è disposto sulla pavimentazione stradale in direzione ortogonale ai flussi di traffico ed è collegato ad un rilevatore posizionato al margine della strada. Rispetto però ai tubi pneumatici, i sensori triboelettrici sono più robusti e resistenti, hanno uno spessore minore (circa 4mm), sono quindi meno visibili e possono essere installati in maniera permanente nella pavimentazione. Il loro costo peraltro è solo di poco superiore.

2.2.1.3 Sensori piezoelettrici

I sensori piezoelettrici sfruttano le proprietà piezoelettriche dei cristalli di quarzo che, sottoposti ad una sollecitazione dinamica, si elettrizzano. Alla superficie del cristallo si formano così 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. Sensori piezoelettrici che misurano il peso sono detti di classe I. I tipi più semplici (di classe II) rilevano però solamente il passaggio dell'asse veicolare. I sensori piezoelettrici sono realizzati con forme diverse, di cavi coassiali o di lastre.

I cavi piezoelettrici sono costituiti da un conduttore in rame immerso in una polvere minerale con proprietà piezoelettriche racchiusa da un tubo esterno di rame. Per prevenire possibili avvolgimenti, il cavo viene in genere alloggiato all'interno di un canale di alluminio, incapsulato entro un composto di sabbia e di resine epossidiche. Il dispositivo viene quindi inserito in un taglio della pavimentazione stradale, avendo cura di rivestire i fianchi laterali con una schiuma di gomma, che serve per ridurre gli attriti durante la compressione, migliorare le misure di compressione ed evitare la presenza di sforzi tangenziali.

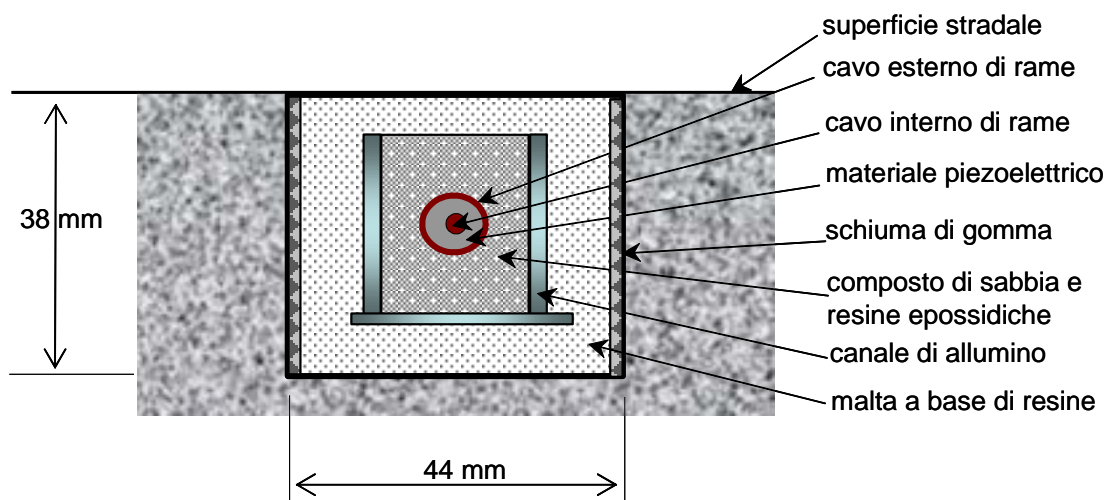


Figura 5 – Profilo e sezione di un cavo triboelettrico per il monitoraggio del traffico.

I sensori piezoelettrici a piastra contengono elementi sensibili di cristalli di quarzo disposti lungo l'asse centrale di un nucleo di alluminio. Il sensore è installato entro un alloggiamento ricavato con un taglio del tappetino stradale, rivestito e stuccato con uno specifico composto di sabbia e resine epossidiche aventi caratteristiche meccaniche e termiche simili a quelle della superficie stradale.

Il principale pregio dei sensori al quarzo risiede nel fatto che essi non perdono le proprietà con il tempo e con la fatica, oltre a non essere sensibili alla temperatura. La precisione ed il costo sono analoghi a quelli delle celle di carico.



Figura 6 – Installazione di una piastra piezoelettrica al quarzo.

2.3 Dispositivi di rilevamento dei veicoli

2.3.1 SPIRE INDUTTIVE

2.3.1.1 L'induzione elettromagnetica

Le spire induttive sono il sistema di monitoraggio del traffico ancora oggi più diffuso, in Italia come nel resto del mondo. Il sensore è costituito da uno o più avvolgimenti di conduttore elettrico installati entro la pavimentazione, alimentati da un generatore di corrente e collegati ad un dispositivo di conteggio.

Il principio di funzionamento si basa sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica, che si verifica in un circuito sottoposto ad un campo magnetico variabile. E' noto che un circuito percorso da corrente genera un campo magnetico, di direzione ed intensità dipendenti dalla forma del circuito, dal numero di avvolgimenti e dall'intensità di corrente (I formula di Laplace), che nel caso di un avvolgimento di n spire si può approssimativamente porre pari a:

$$B = \frac{\mu ni}{x}$$

essendo μ la permeabilità magnetica del vuoto, i l'intensità di corrente nel circuito e x la lunghezza della bobina.

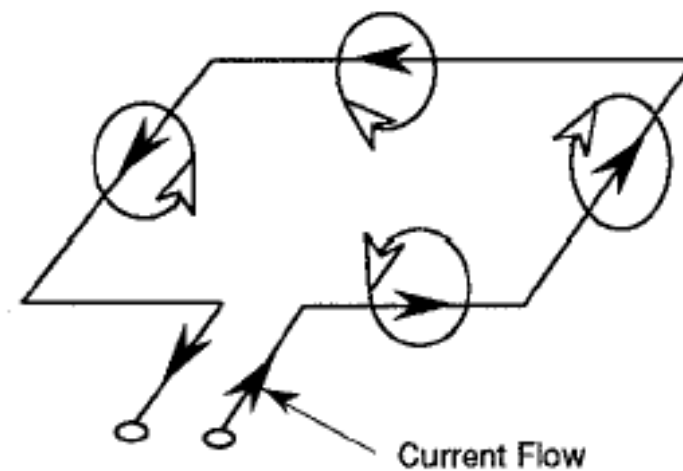


Figura 7 – Direzione della corrente ed orientamento del campo magnetico.

Inoltre, dato un circuito immerso in un campo magnetico B , risulta definito il flusso magnetico $\Phi(B)$ concatenato al circuito stesso. Il flusso del campo magnetico concatenato con il circuito che lo ha generato si chiama flusso magnetico auto-concatenato. Nel caso di una spira di area A ed n avvolgimenti, questo vale:

$$\Phi_B = nBA = \mu \frac{n^2 Ai}{x} = Li$$

La grandezza L è detta auto-induzione o induttanza. Analogamente si definisce il flusso concatenato con un secondo circuito immerso nel campo magnetico generato dal precedente e si introduce il coefficiente di mutua induzione:

$$\Phi_2 = n_2 A_2 B_1 = \mu \frac{n_2 A_2 n_1 i_1}{x_1} = M_{21} i_1$$

essendo n_2 ed A_2 rispettivamente il numero di avvolgimenti e l'area del secondo circuito. Una formula analoga alla precedente vale naturalmente per il flusso del campo magnetico generato dal secondo circuito concatenato con il primo circuito

L'induzione elettromagnetica è spiegata dalla legge di Faraday, secondo la quale, quando il flusso magnetico concatenato con un circuito viene a variare, nel circuito si presenta una forza elettromotrice indotta:

$$f_i = - \frac{d}{dt} \Phi(\vec{B})$$

2.3.1.2 Funzionamento delle spire induttive

Le spire induttive utilizzate per il monitoraggio del traffico, come detto, sono costituite da uno o più avvolgimenti di materiale conduttore alimentati da un generatore di f.e.m. alternata, installati nella pavimentazione stradale. La spira genera un campo magnetico che in prima approssimazione può essere considerato verticale, almeno in prossimità della spira stessa. L'induzione elettromagnetica si manifesta quando un veicolo transita sulla spira, nel suo telaio, costituito da un gran numero di dipoli e componenti metalliche, indotte dal campo magnetico generato dalla spira delle correnti parassite, di verso opposto a quello della corrente della spira. Sommando le correnti parassite che circolano nello stesso verso nei dipoli metallici del veicolo, si può assimilare il telaio del veicolo ad un circuito in moto parallelo alla spira.

Il veicolo costituisce quindi un secondo circuito, in moto rispetto al precedente, che genera a sua volta un campo magnetico, che si oppone a quello della spira e ne riduce l'induttanza. Si genera così un fenomeno di mutua induzione, per cui la coppia spira-veicolo agisce come un trasformatore.

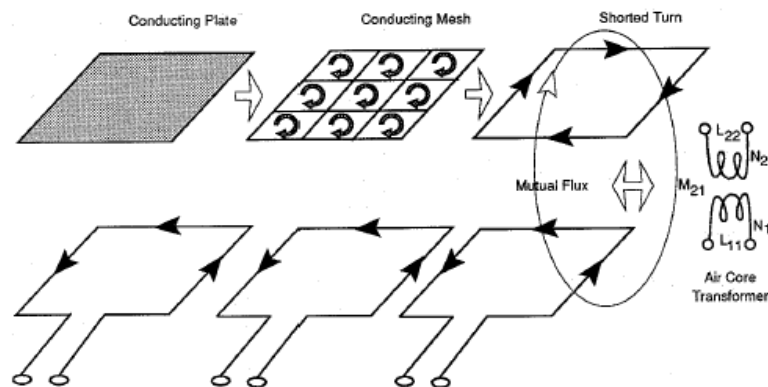


Figura 8 – Schema di funzionamento elettromagnetico della coppia spira-veicolo.

La riduzione di induttanza determina un aumento della frequenza f di oscillazione della corrente che, trascurando la resistenza, vale (Cfr. Sette, 1982, pag.569):

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

essendo L l'induttanza e C la capacità della spira.

I segnali prodotti dalla spira induttiva con frequenza variata sono tradotti in forma digitale da un'unità elettronica.

2.3.2 SENSORI A RAGGI INFRAROSSI (PASSIVI)

I sensori a raggi infrarossi basano il loro funzionamento su un sistema ottico che utilizza un materiale sensibile all'infrarosso montato sul piano focale. In questi dispositivi il sensore è un elemento sensibile all'infrarosso che converte l'energia riflessa o emessa in segnali elettrici.

Possono essere suddivisi in due classi: sensori passivi ed attivi. I primi non trasmettono energia ma rilevano quella emessa direttamente dai veicoli, dalla superficie stradale e da altri oggetti nel campo di osservazione e quella emessa dall'atmosfera e dal sole e riflessa dai veicoli, dalla superficie stradale e da altri oggetti. I secondi illuminano la zona da rilevare con energia infrarossa a bassa potenza trasmessa da diodi laser che operano nella regione vicino all'infrarosso dello spettro magnetico ($0.85 \mu\text{m}$). Le due tipologie di sensori a raggi infrarossi presentano il vantaggio di non causare disturbo alla circolazione stradale durante la loro installazione e non risentono di degradamento delle prestazioni in presenza di nebbia, mentre risentono degli effetti di riflesso in condizioni di pioggia o neve.

I *sensori infrarossi passivi* sono composti da un apparecchio ricevitore in grado di rilevare l'energia delle radiazioni infrarosse emesse e riflesse dalla pavimentazione stradale o dalla superficie dei veicoli attraversanti la sua zona di influenza. Il suo utilizzo, quindi, riguarda esclusivamente il rilevamento del passaggio dei veicoli e, nel caso in cui il rilevamento riguardi più zone di osservazione, possono fornire anche la misura della velocità e della

lunghezza. Per poter effettuare la misura delle portate stradali, il sensore è installato al di sopra della mezzera 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. Questa differenza di energia rilevata dal sensore risulta direttamente proporzionale alla temperatura assoluta del veicolo ed all'emissività della superficie metallica del veicolo stesso (l'emissività è pari al rapporto tra l'energia effettivamente emessa da un materiale e l'energia emessa da una sorgente perfetta alla stessa temperatura). Più in dettaglio l'energia emessa dal veicolo può essere espressa come $\epsilon_v T_v$ mentre $(1 - \epsilon_v) T_{atm}$ è l'energia riflessa dal veicolo; analogamente $(\epsilon_s T_s)$ è l'energia emessa dalla superficie stradale, $(1 - \epsilon_s) T_{atm}$ è l'energia riflessa dalla superficie stradale, e la temperatura apparente del veicolo può essere scritta come:

$$T_{v,a} = \epsilon_v T_v + (1 - \epsilon_v) T_{atm}$$

e, analogamente, quella della superficie stradale come:

$$T_{s,a} = \epsilon_s T_s + (1 - \epsilon_s) T_{atm}$$

dove

T_v = temperatura assoluta del veicolo;

T_s = temperatura assoluta della superficie stradale;

T_{atm} = temperatura dell'atmosfera;

ϵ_v = emissività del veicolo;

ϵ_s = emissività della superficie stradale.

La differenza delle due temperature rilevata dal sensore è quindi:

$$\Delta T = \epsilon_s T_s - \epsilon_v T_v + \epsilon_v - \epsilon_s T_{atm}$$

e se risulta $T_s = T_v$ si avrà:

$$\Delta T = (\epsilon_s - \epsilon_v) T_s - T_{atm} (\epsilon_s - \epsilon_v)$$

Quindi, un veicolo, entrando nel campo di osservazione del sensore, genera un segnale proporzionale al prodotto delle differenze fra le emissività del veicolo e della superficie stradale e fra le temperature assolute della superficie stradale e dell'atmosfera. La temperatura assoluta dell'atmosfera dipende da diversi fattori fra cui l'umidità e la pioggia che ne fanno aumentare il valore; questo comporta una diminuzione del segnale prodotto dal passaggio di un veicolo.



Figura 9 – Sensori infrarossi passivi Eltec 833 and 842.

2.4 Dispositivi di conteggio e misura della velocità

2.4.1 SENSORI MAGNETICI

I sensori magnetici sono dei dispositivi che indicano la presenza di un oggetto metallico rilevando la perturbazione del campo magnetico terrestre indotta dall'oggetto stesso. Nelle applicazioni stradali le tipologie utilizzate sono principalmente tre:

I magnetometri a nucleo saturabile biassiali;

I magnetometri a induzione;

I sensori magneto-dinamici o sensori VMI (*vehicle magnetic imaging*).

2.4.1.1 Magnetometri a nucleo saturabile biassiali

Sono dei rilevatori statici che misurano i cambiamenti delle componenti verticali e orizzontali del campo magnetico terrestre prodotti da un veicolo. Sono costituiti da due serie di avvolgimenti: la prima è disposta verticalmente ed è sensibile ai cambiamenti della componente verticale del campo magnetico terrestre; la seconda è disposta orizzontalmente ed è allineata alla direzione della corrente veicolare in modo da rilevare la presenza di un veicolo nella corsia monitorata. A causa di una anomalia del campo magnetico terrestre, il dispositivo misura una variazione di voltaggio del circuito elettrico: quando questa variazione è maggiore di una predeterminata soglia viene rilevato il passaggio di un veicolo. I dati forniti sono gli stessi delle spire induttive e trovano applicazione in monitoraggi temporanei o su viadotti e ponti dove l'installazione delle spire è difficoltosa.

2.4.1.2 Magnetometri a induzione

I magnetometri a induzione o dispositivi magnetici sono costituiti da una bobina sensibile al cambiamento delle linee di forza del campo magnetico terrestre. Il veicolo, poiché è costituito da elementi in ferro, nel momento del passaggio su tali sensori, comporta una variazione nel tempo dell'intensità campo magnetico che comporta un certo voltaggio. Questo permette di valutare il passaggio di un veicolo. Questi sensori sono in grado di fornire misure relative al volume, all'occupazione della corsia e alla velocità. Normalmente richiedono una velocità minima di percorrenza del veicolo e non sono quindi utilizzati per il rilevamento della presenza veicolare.

Si differenziano, principalmente, in base alle dimensioni: alcuni dispositivi sono composti da una sonda di forma cilindrica (di diametro pari a circa 50 mm) annegata ad una profondità di circa 50 cm (utilizzata nel caso di installazione su viadotti e ponti); altri sensori hanno forma di parallelepipedo (di dimensioni circa 7x12x50 cm) e sono montati a filo con la pavimentazione stradale.

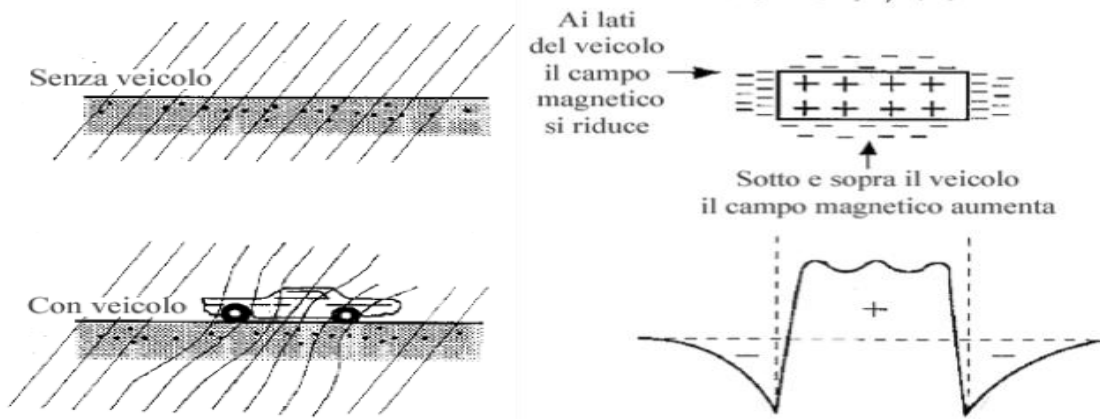


Figura 10 – Principio di funzionamento dei sensori magnetici.



Figura 11 – A sinistra: un sensore magnetico passivo 3M Microloop Probes Model 701 e a destra un sensore magnetico G-2 Nu-Metrics Groundhog (a destra).

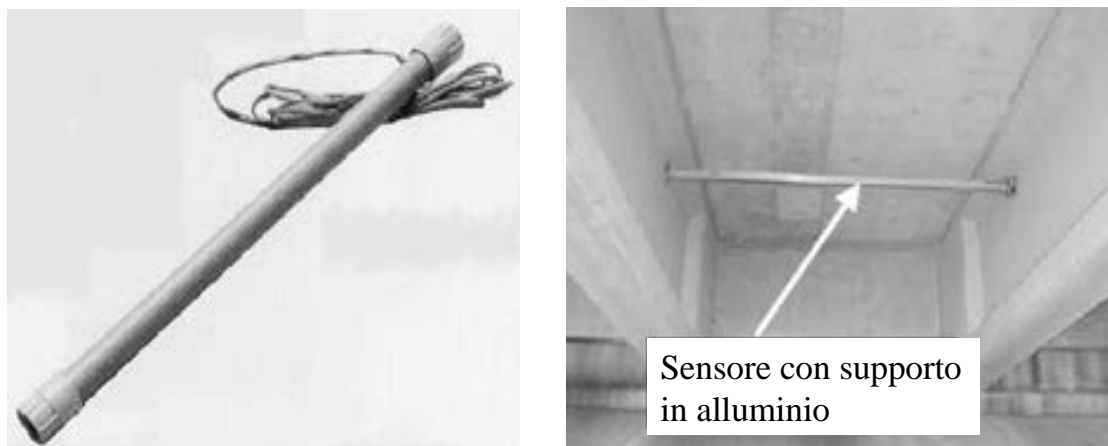


Figura 12 – Un sensore sonda biassiale Safetran Magnetic Sensor 231E, da inserire al di sotto della pavimentazione o nell'intradosso di viadotti (a destra).

2.4.1.3 Magneto-dinamici

Questi rappresentano i più moderni sensori di tipo intrusivo attualmente in commercio in quanto sono capaci di rilevare una vasta gamma di dati di traffico, come il passaggio dei veicoli, la velocità di transito, la lunghezza veicolare, il tempo di occupazione della sezione stradale e il distanziamento temporale. Hanno l'aspetto di una piastra rettangolare di piccole dimensioni, e sono costituiti da un microprocessore alimentato da batterie ricaricabili. Se vengono impiegati per rilevamenti prolungati, il sensore VMI deve essere alloggiato all'interno di una fessura verticale praticata nella pavimentazione stradale, mentre se viene utilizzato per rilevamenti di breve può essere installato sulla superficie del piano viabile, purché inserito all'interno di un idoneo alloggiamento metallico da fissare con appositi chiodi alla pavimentazione bituminosa.

Questi sensori rilevano il passaggio dei veicoli stradali basandosi sull'analisi della variazione del campo magnetico terrestre, indotte dalla interferenza delle componenti metalliche del veicolo. In corrispondenza di ogni cambiamento del campo magnetico terrestre i circuiti GMR (*Giant Magneto Ratio*) presenti all'interno del rilevatore producono un segnale elettrico, il quale risulta direttamente proporzionale alla massa magnetica veicolare che lo ha provocato. Tali segnali elettrici sono analizzati dal microprocessore del sensore e quindi immagazzinati nella sua memoria interna. Ultimata la registrazione in sito, i dati memorizzati possono essere trasferiti ad un computer che, utilizzando un appropriato software di analisi, organizza e restituisce un'ampia gamma di informazioni sul flusso di traffico rilevato, permettendo di ottenere: conteggi veicolari, misure di velocità, tempi di occupazione, lunghezze veicolari e distanziamenti temporali.

I vantaggi della tecnica di rilevamento con sensori magnetodinamici 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.



Figura 13 – Sensore magnetodinamico Nu-Metrics, da inserire al di sopra della pavimentazione, utilizzando per protezione un rivestimento rigido (a destra).

2.4.2 SENSORI RADAR A MICROONDE

I radar (*Radio Detection And Ranging*) a microonde sono dei sensori che utilizzano una lunghezza d'onda dell'energia trasmessa compresa tra 1 e 30 cm, a cui corrisponde un intervallo di frequenza da 1 a 30 GHz (quelli impiegati nel monitoraggio del traffico operano a intervalli di frequenza prossimi a 10.5, 24.0 e 34.0 GHz). Quando un veicolo attraversa il raggio di energia trasmessa dal radar una parte di questa viene riflessa verso l'antenna del sensore permettendo il rilevamento del veicolo. I sensori a microonde si distinguono in due diverse tipologie:

Radar microonde con rilevazione dell'effetto Doppler;

Radar microonde con rilevazione della presenza.

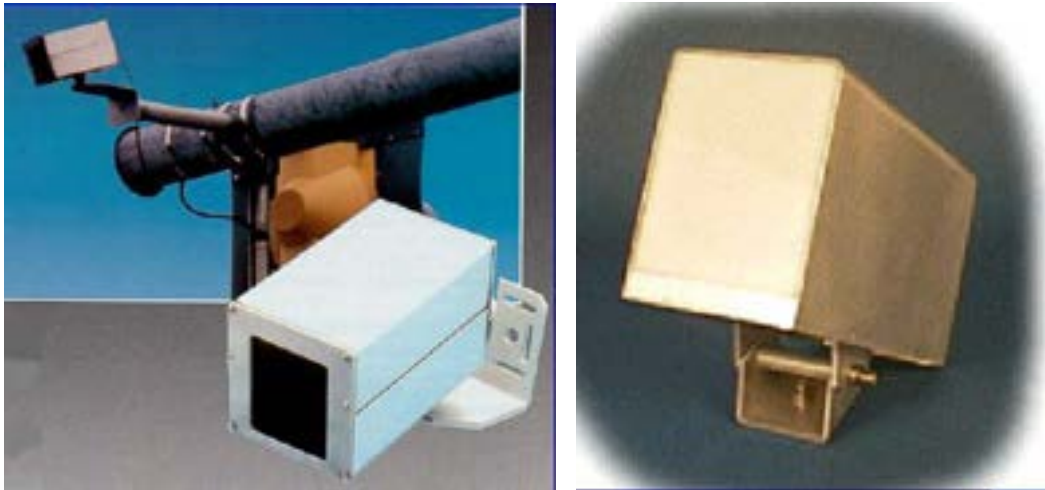


Figura 14 – Sensori radar a micro-onde ad effetto Doppler (a sinistra, il sensore TC20) ed a rilevazione di presenza (a destra il sensore Naztec 150LX per la rilevazione di una singola corsia).

Il radar a microonde ad effetto *Doppler*, anche noto come radar ad onde continue, utilizza un rilevatore, chiamato anche “cinemometro”, costituito essenzialmente da un’antenna direzionale che emette, in un fascio assai ristretto, onde elettromagnetiche con frequenza costante dell’ordine dei 10 GHz (microonde). L’antenna ha anche una funzione ricevente e viene installata fuori dalla sede viaria, fissandola o ad un palo posto a bordo strada o ad un portale già esistente oppure al di sotto di un cavalcavia sovrastante la strada stessa.

Il principio di funzionamento del sensore si basa sull’effetto *Doppler-Fizeau*, che consiste nella modificazione della frequenza di un’onda elettromagnetica in presenza di moto relativo tra sorgente e ricettore. In dettaglio, quando l’onda (di frequenza f) emessa dall’antenna (sorgente fissa) incontra un veicolo in transito, quest’ultimo, a causa dell’effetto *Doppler*, riceve un’onda di frequenza variata (f'); una frazione di quest’onda viene riflessa dal ricettore e, sempre per il principio *Doppler*, viene rilevata dall’antenna con frequenza nuovamente variata (f''): in tal caso, infatti, il veicolo si comporta da sorgente mobile di onde di frequenza f' mentre l’antenna funge da ricettore fisso. 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 frequenza del segnale ricevuto decresce se il veicolo si allontana dal radar e aumenta se il veicolo si avvicina ad esso.

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 λ e dipende inoltre dall’angolo ϕ che il fascio d’onde emesso forma con il vettore velocità del veicolo; in altri termini:

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

dove F_d è espressa in Hz, v in m/s, λ in m e ϕ è, in genere, assunto pari a 25° .

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 la differenza tra la frequenza emessa e la frequenza riflessa aumenta al crescere della frequenza di emissione, quindi radar operanti ad alte frequenze sono più sensibili al movimento dei veicoli. Infine, i *Doppler microwave radar* non possono rilevare i veicoli fermi o viaggianti a velocità molto basse (approssimativamente inferiore a 3 Km/h).

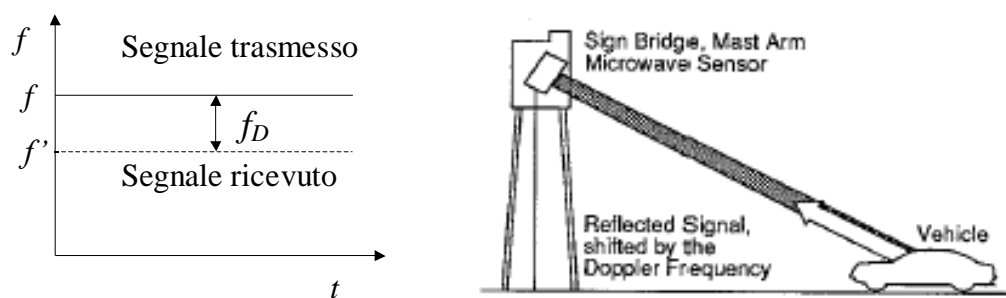


Figura 15 – Principio fisico dell'effetto Doppler (a sinistra) e modalità di applicazione dei sensori di monitoraggio con micro-onde radar (a destra).

La seconda tipologia di sensori a microonde è rappresentata dal *true-presence microwave radar* (anche noto come *Frequency Modulated Continuous Wave radar*). La differenza sostanziale rispetto al primo tipo di radar a microonde risiede essenzialmente nella frequenza dell'onda elettromagnetica emessa; mentre il *Doppler microwave radar* emette un'onda con frequenza costante, il *true-presence microwave radar* emette invece un'onda continua a frequenza modulata, la cui frequenza cioè varia continuamente nel tempo. Il radar rileva la presenza di un veicolo in base alla differenza di frequenza trasmessa tra l'istante in cui l'energia è emessa e quello in cui è ricevuta. Inoltre, il radar divide il campo di osservazione definito dalla sua impronta ellittica sulla strada in moduli separati da una distanza nota e tali da permettere al segnale riflesso di essere scomposto e identificato; il tempo impiegato da un veicolo per il passaggio da un modulo al successivo consente il calcolo della velocità del veicolo stesso.

Oltre al conteggio dei veicoli attraversanti il suo campo di azione ed alla misura diretta delle loro velocità, tale tipo di sensore 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.

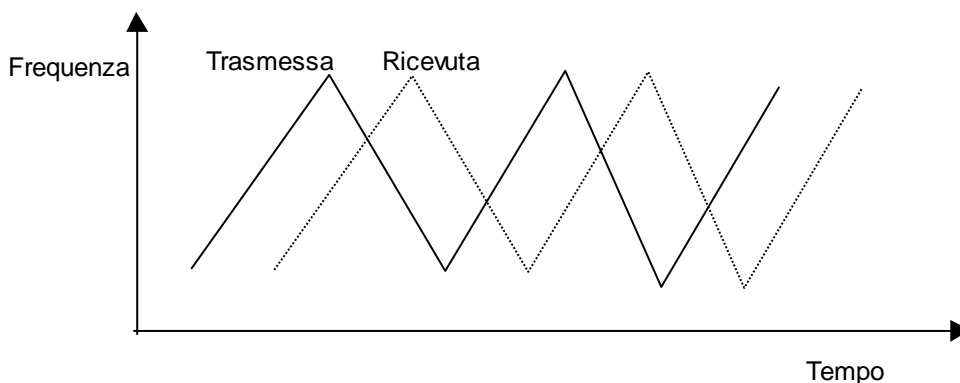


Figura 16 – Principio di rilevazione della presenza di un veicoli con sensore radar

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.

2.4.3 SENSORI LASER A RAGGI INFRAROSSI DI TIPO ATTIVO

A differenza dei dispositivi ad infrarossi passivi, i sensori di tipo attivo permettono non soltanto il rilevamento della presenza o del passaggio dei veicoli, ma anche la misura diretta delle velocità e la loro classificazione. Il sensore, installato come il tipo passivo, è costituito da una sorgente e da un ricevitore di raggi infrarossi (2 diodi laser con lunghezza d'onda 0,9 m). I 2 diodi laser inviano impulsi separati di pochi gradi fra loro, in modo tale che l'intervallo in tempo tra il passaggio attraverso il primo ed il secondo fascio di raggi infrarossi consenta di determinare la velocità del veicolo, mentre la lettura dei segnali riflessi dal veicolo fornisce immagini bidimensionali o anche tridimensionali, che consente di classificare i veicoli in base alla sagoma. I ricetrasmittitori possono essere usati per trasmettere informazioni agli utenti modulando e codificando i raggi infrarossi con dati appropriati.



Figura 17 – Dispositivo di rilevazione della velocità SODI Autovelox 105 SE.

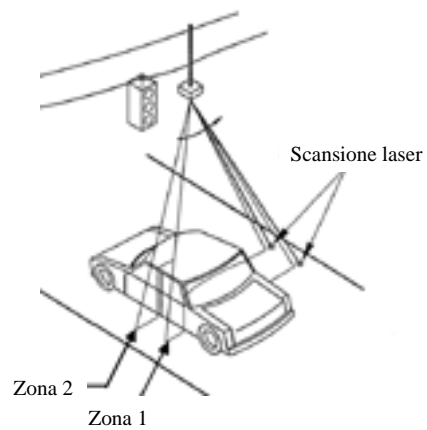
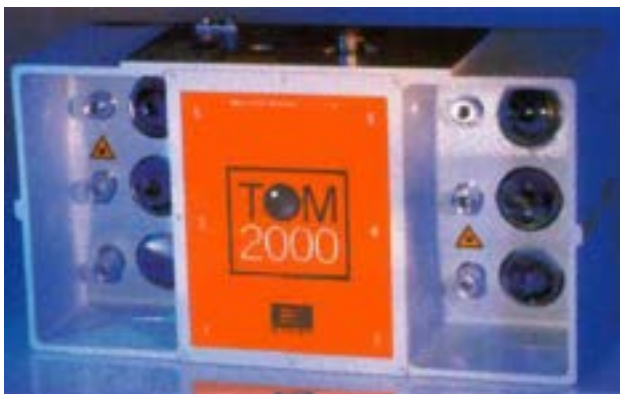


Figura 18 – Dispositivo di rilevazione dei veicoli e della velocità Efkon TOM 2000.

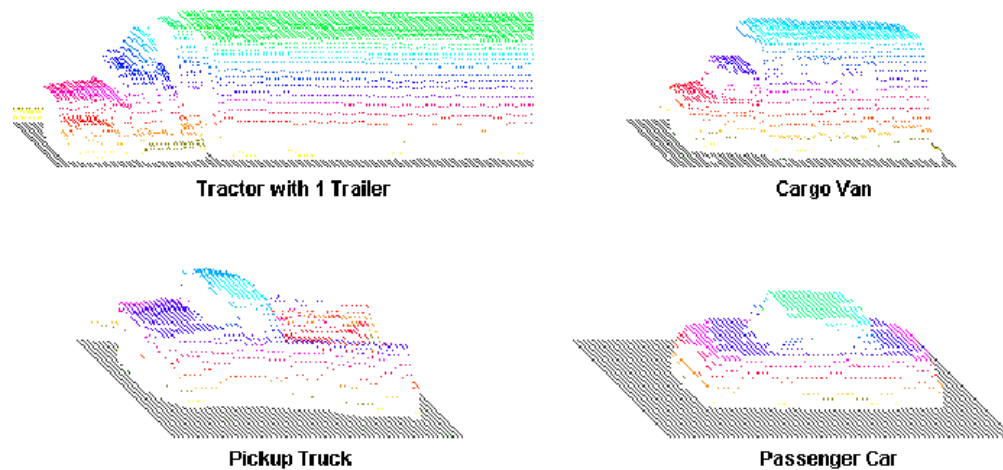


Figura 19 – Profili veicolari ottenibili con scansione laser a raggi infrarossi.

2.4.4 SENSORI SONICI E ULTRASUONICI

Attualmente risultano disponibili sul campo due tipologie di sensori acustici:

A ultrasuoni;

Acustici passivi.

2.4.4.1 Sensori acustici a ultrasuoni

I sensori ad ultrasuoni sono tra i rilevatori acustici più utilizzati. Questi consentono il rilevamento degli stessi parametri del traffico valutabili con le spire magnetiche: portata veicolare, tasso di occupazione, velocità di transito (sia con installazione di un doppio sensore sia con trasmissione di impulsi di ultrasuoni). Un sensore ad ultrasuoni è uno strumento di dimensioni contenute costituito essenzialmente da un generatore e da un ricevitore di onde sonore (ultrasuoni) di frequenza compresa tra 25 kHz e 60 kHz. Tale strumento non richiede interventi sul manto stradale ed è installato, in genere, perpendicolarmente su un portale, su un cavalcavia sovrastante la via di corsa, oppure orizzontalmente a lato della strada.

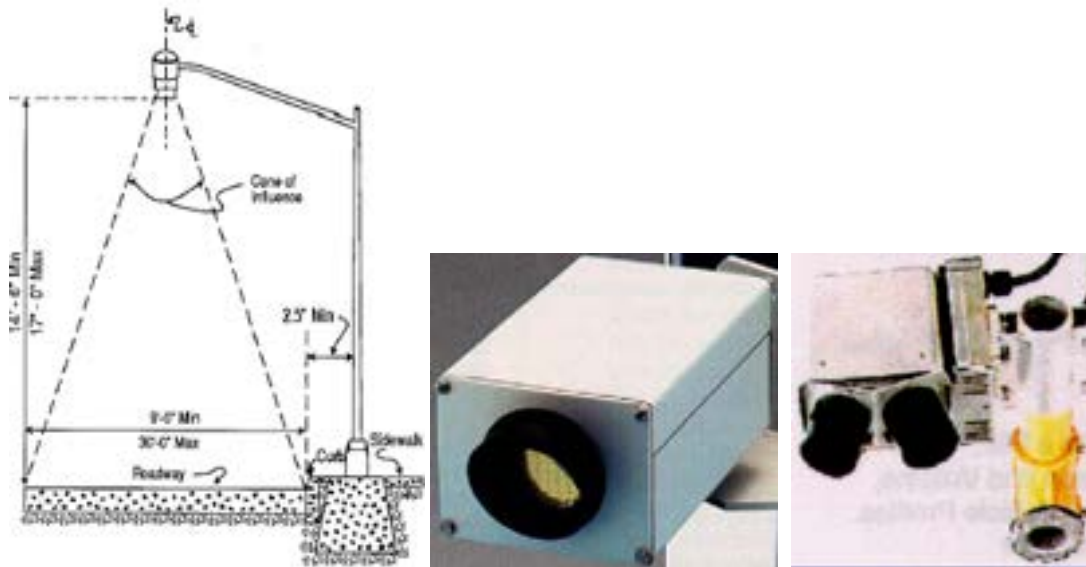


Figura 20 – Microwave Sensors TC-30C, Single Lane Model (a sinistra) e Novax ELA 155 Two-Lane Model (a destra)

Il principio di funzionamento del sensore 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. L'energia ultrasonica ricevuta dal sensore viene convertita dal processore in segnale elettrico. Il generatore emette degli impulsi di energia sotto forma di fasci ristretti di onde ultrasonore dirigendole verso il basso, in direzione perpendicolare alla superficie stradale. In assenza di veicoli, l'impulso ultrasonoro viene riflesso dalla pavimentazione e ritorna al ricevitore con un certo ritardo Δt rispetto all'emissione; tale ritardo consente di valutare la distanza d del sensore dalla strada come:

$$d = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$$

essendo v la velocità di propagazione delle onde ultrasonore. Al passaggio di un veicolo, l'impulso ultrasonoro incontra invece come parete riflettente la parte superiore del veicolo; in tal caso, sulla base del tempo trascorso tra l'emissione dell'onda ed il ritorno al ricevitore dell'onda riflessa, il sensore è in grado di misurare la sua distanza dalla superficie riflettente del veicolo, che risulta diversa da quella tra il sensore stesso e la superficie stradale; ciò comporta la produzione di un segnale e quindi il rilevamento del passaggio del veicolo.

Nel caso di impulsi trasmessi lungo due direzioni definite da angoli incidenti noti è possibile calcolare la velocità veicolare tramite la registrazione degli istanti in cui il veicolo attraversa ciascun fascio di onde. In alternativa, esistono sensori ad ultrasuoni con frequenza costante

che permettono la misura della velocità sfruttando il principio *Doppler*. Questi sensori hanno lo svantaggio di essere più costosi di quelli ad impulsi.

In particolare i sensori ultrasonici trasmettono una serie di impulsi di ampiezza T_p (in genere compresa tra 0.02 e 2.5 millisecondi) ad intervalli di ripetizione regolari di durata T_o (in genere compresa tra 33 e 170 millisecondi). Il sensore misura il tempo necessario perché l'impulso arrivi al veicolo e ritorni al trasmettitore (Figura 21).

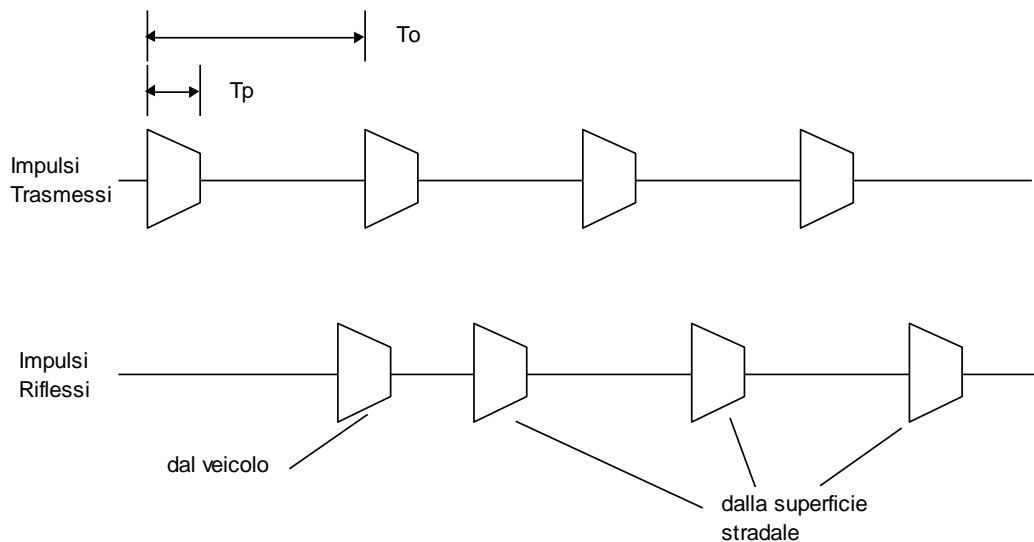


Figura 21 – Principio di trasmissione e riflessione di impulsi ultrasonici sulla superficie stradale in presenza o in assenza di un veicolo.

In definitiva, questo sensore, di tipo “non intrusivo” e “puntuale”, rileva il passaggio dei veicoli e quindi la portata veicolare in virtù della misura di distanze (in condizioni di funzionamento ottimali, la precisione di misura delle distanze è di $\pm 0,5$ m, e ciò a causa della dipendenza della velocità di propagazione delle onde dall’umidità dell’aria e dalla temperatura). È importante sottolineare che questa tipologia di sensore, rilevando la sua distanza dalla parte superiore dei veicoli in transito, permette anche una distinzione dei veicoli per categorie (autovetture, furgoni, camion, ecc.) in funzione della sagoma del veicolo stesso; inoltre, potendo registrare l’intervallo di tempo in cui l’onda riflessa da un veicolo viene captata dal ricevitore, consente di risalire al tasso di occupazione per la corsia oggetto di rilevamento. Infine, se vengono associati due sensori ad ultrasuoni (disposti su di un unico supporto a breve distanza tra loro) è possibile l’accertamento in via diretta della velocità dei veicoli transitanti.

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 (nelle migliori condizioni si può arrivare ad un tasso di errore di circa l’1%) 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, è bene sottolineare che intervalli di ripetizione grandi possono comportare delle misure dell'occupazione poco accurate sulle strade di alta categoria dove i veicoli si muovono ad alta velocità a causa della scarsità degli impulsi trasmessi. Infine, 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 (cavalcavia, portali per altri usi).

2.4.4.2 Sensori acustici passivi

I sensori acustici passivi forniscono il passaggio, la presenza e la velocità veicolare; essi rappresentano dei rilevatori non intrusivi di riconoscimento dei veicoli, basati 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 linea generale, il rilevamento del passaggio dei veicoli prevede l'utilizzo di una serie di sensori acustici posti a intervalli regolari ai margini della strada e collegati ad un sistema di elaborazione dei segnali. Quando un veicolo stradale attraversa la zona di rilevazione, si rileva un aumento di energia sonora, cui corrisponde un segnale di presenza del veicolo. Il segnale dura per tutto il tempo di permanenza del veicolo nell'area di rilievo; quando il veicolo supera tale zona, l'energia sonora decresce portandosi al di sotto della soglia di rilevazione ed il segnale scompare.



Figura 22 – Sensore IRD SmartSonic Single Lane Model (a sinistra) e SmarTek SAS-1 Multiple Lane Model

I principali sensori presenti in commercio sono due. Il sensore Smartsonic che rileva i veicoli misurando il ritardo dell'arrivo del suono fra due serie di microfoni distanziati verticalmente. Quando il veicolo si trova all'interno della sua zona di rilevamento il suono arriva quasi contemporaneamente sia ai microfoni superiori che a quelli inferiori; al contrario, quando il veicolo si trova all'esterno della zona di rilevamento il suono arriva al microfono superiore ritardato. L'ampiezza della zona di rilevamento varia da 6 a 11 metri. La velocità è rilevata utilizzando un algoritmo che assume una lunghezza media veicolare. Questo dispositivo, che fornisce volume, occupazione, velocità e classificazione veicolare, è consigliato per applicazioni su ponti o strade dove sono richiesti sensori non intrusivi e dove

la corrente veicolare non è caratterizzata da basse velocità (inferiori a 32 km/h) o da fenomeni di stop&go.

Il secondo sensore è il SAS-1 che, utilizzando una disposizione distribuita di microfoni, consente il rilevamento fino ad un massimo di 6 corsie. La zona di rilevamento è di circa 3.6 metri nella direzione del traffico e richiede un'altezza di montaggio che varia da 5 a 12 metri. Fornisce volume, occupazione, velocità veicolare di ogni corsia.

In conclusione, i sensori passivi sono utilizzati prevalentemente per il rilevamento della presenza dei veicoli su un certo tratto di strada e quindi, sono poco impiegati nel rilevamento del traffico veicolare.

2.5 Sensori video con elaborazione delle immagini

Il processo automatizzato di trattamento delle immagini filmate è indicato in letteratura con la sigla T.A.I. (Trattamento Automatico di Immagini). Questo sistema risulta strutturato in maniera complessa, avvalendosi di una serie di strumenti operativi, quali:

Una o più telecamere che ricevono le immagini di traffico, convertendole in segnale elettrico;

Un videoregistratore (da impiegare solo nel caso di trattamento automatico a posteriori) che registra su cassette le scene di traffico filmate;

Un convertitore analogico-digitale che trasforma il segnale elettrico uscente dalla telecamera (o dal videoregistratore) in forma digitale;

Un elaboratore, munito di software specializzato, che provvede alla manipolazione delle immagini digitali fornite dal convertitore ed alla conseguente valutazione delle variabili di traffico di interesse.

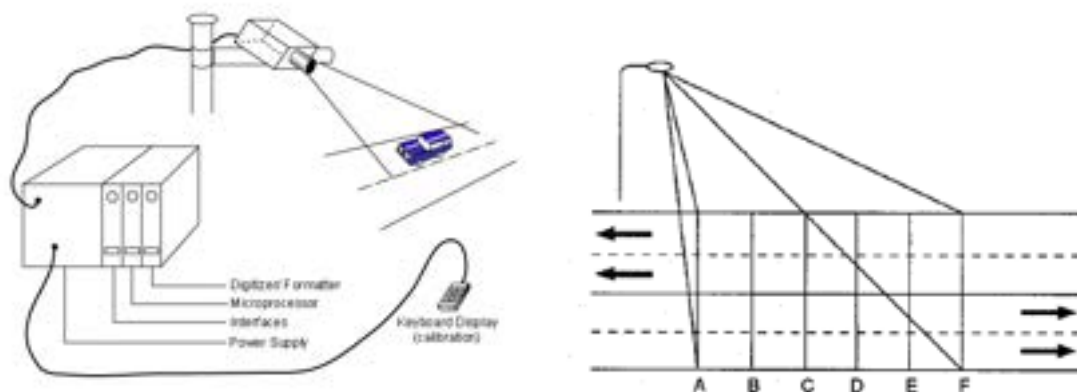


Figura 23 – Architettura e principio di funzionamento dei sensori video per elaborazione delle immagini

Il trattamento automatico delle immagini prevede l'uso di un PC che, dotato di un complesso software risolutivo, interviene sulle immagini digitalizzate (provenienti dalla telecamera o dal videoregistratore) conducendo un insieme di operazioni specifiche (matematiche, morfologico-matematiche, statistiche e di altro genere) volte all'ottenimento dei parametri significativi del traffico veicolare.

Algoritmi di trattamento delle immagini che analizzano immagini in bianco e nero esaminano le variazioni dei livelli di grigio in gruppi di pixel contenuti in un fotogramma rimuovendo eventuali variazioni di livello sullo sfondo causate dalle condizioni meteorologiche, da ombre, ecc. Immagini a colori consentono di migliorare l'individuazione di un veicolo in condizioni meteorologiche sfavorevoli o di installazione non ideale della telecamera. Tuttavia, la loro ridotta sensibilità ne hanno limitato lo sviluppo.

In rapporto all'estensione del dominio spaziale di riferimento, è possibile classificare i sistemi di T.A.I. esistenti in commercio in due grandi categorie:

Sistemi di trattamento di zone limitate dell'immagine, detti anche *tripwire systems*;

Sistemi di trattamento dell'intera immagine utile, detti anche *tracking systems*.



Figura 24 – Posizionamento di telecamera con illuminatore ad infrarossi (a sinistra) e principio di rilevamento video con elaborazione delle immagini mediante spire virtuali (a destra).

I sistemi della prima categoria (detti anche *tripline systems*) trattano una o più piccole porzioni dell'immagine di traffico visualizzata, processando così un numero limitato di pixel. Le aree trattate sono 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. Tali sistemi utilizzano algoritmi capaci sostanzialmente di rilevare le variazioni di luminosità che i pixel costituenti l'area trattata subiscono al passaggio di un veicolo. I vantaggi di questi sistemi sono che risultano meno costosi rispetto a quelli che trattano la totalità dell'immagine, ma forniscono essenzialmente gli stessi parametri di traffico (portata, velocità calcolata in base al tempo impiegato ad attraversare la spira virtuale di nota lunghezza, tasso di occupazione), e che con l'uso di una singola telecamera è possibile riprodurre il funzionamento di più spire

magnetiche, garantendo nel contempo una visione continua dello scenario di traffico. Tuttavia, rispetto alle spire induttive, tali sistemi presentano l'inconveniente di essere condizionati da eventuali fattori di disturbo (cattive condizioni climatiche, variabilità della luminosità, effetti di mascheramento, ecc.) i quali possono provocare errori non trascurabili sul rilevamento dei veicoli.

I sistemi della seconda categoria trattano la totalità dell'immagine o, quantomeno, la parte dell'immagine relativa al solo tronco stradale visualizzato. Questi sistemi sono in grado di rilevare tutti i veicoli che si trovano su un fotogramma e di seguirli nei fotogrammi successivi, riuscendo così a garantire una quantità di informazioni superiore a quella fornita dai classici sensori puntuali.

Gli algoritmi utilizzati sono capaci di isolare in ogni fotogramma (mediante delle operazioni di morfologia matematica) l'area che definisce il singolo veicolo e di seguirne il movimento procedendo per differenza e confronto (pixel per pixel) tra le varie immagini successive. Tali sistemi possono fornire non soltanto i parametri fondamentali del traffico (portata, velocità, tasso di occupazione, densità) ma anche delle ulteriori informazioni; essi, infatti, consentono di seguire la traiettoria dei veicoli, di rilevare una situazione anomala del deflusso veicolare (veicoli fermi, cambi di corsia, incidenti, ingorghi ecc.), di osservare i movimenti di svolta agli incroci, di classificare i veicoli secondo le loro dimensioni, ecc. I sistemi di tipo *tracking* si distinguono in *closed-loop* e *data association*.

La prerogativa dei secondi è quella di identificare i veicoli tracciandone la traiettoria nel passaggio da una telecamera all'altra. In questo modo, essi possono fornire informazioni sui tempi di percorrenza dei rami stradali e su coppie O/D.

Le performance dei sistemi di T.A.I. attualmente presenti sul mercato sono variabili e dipendono da numerosi fattori (condizioni di installazione delle telecamere, condizioni meteorologiche e di luminosità, tipologia di trattamento adoperata).

Test svolti indicano che l'effetto di telecamere a bassa sensibilità e di segnali video inadeguati è più evidente durante la notte, all'alba e al tramonto. Condizioni di grave congestione del traffico non rappresentano più un problema per i moderni sistemi di T.A.I. La loro precisione è, invece, strettamente legata all'installazione del sensore (in particolare all'altezza), alla geometria della strada e al numero di zone da rilevare (decrese all'aumentare del numero di zone da rilevare per ogni telecamera).

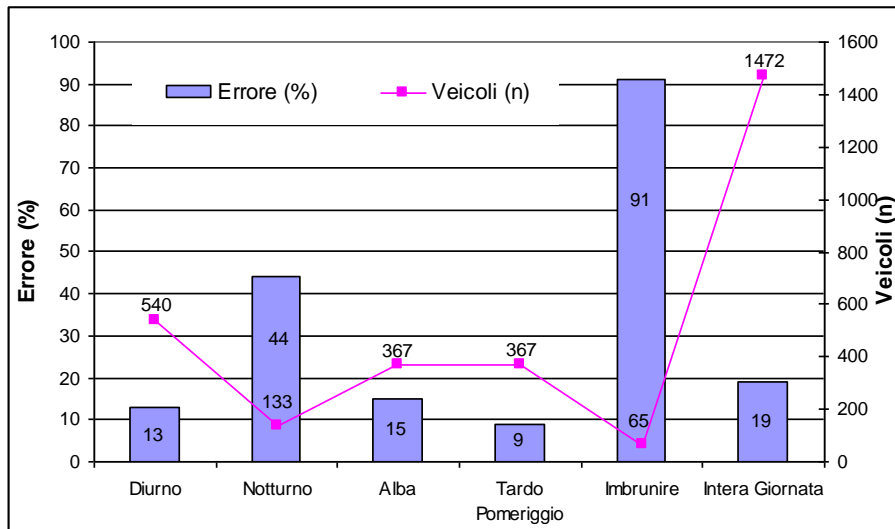


Figura 25 – Degradamento delle prestazioni di riconoscimento dei veicoli con sensori video al variare delle condizioni di luce.

Anche l'orientamento della telecamera influisce sul rilevamento: la visione verso monte, ossia orientare la telecamera controcorrente rispetto al verso del flusso veicolare, presenta il vantaggio di consentire la visione di un incidente senza che questa sia ostacolata dal formarsi della conseguente coda. Di contro, veicoli di elevata altezza, così come la luminosità dei fari anteriori di notte, possono intralciare il campo visivo.

L'orientamento verso valle, invece, nasconde la presenza delle telecamere montate su un viadotto evitando di influenzare il comportamento degli utenti. Questo tipo di visione agevola il riconoscimento dei veicoli poiché questi vengono visti prima quando sono vicini alla telecamera; inoltre, ne facilita il riconoscimento notturno che è così basato sul rilevamento dei fari posteriori.

Sebbene l'estensione del campo di rilevamento indicato da alcuni produttori sia pari a circa 10 volte l'altezza di montaggio della telecamera, questa è notevolmente influenzata dalla geometria della strada, dalla composizione del traffico veicolare e dal livello di congestione. In particolare, è determinante il distanziamento spaziale che la telecamera osserva per distinguere due veicoli che si seguono Figura 26.

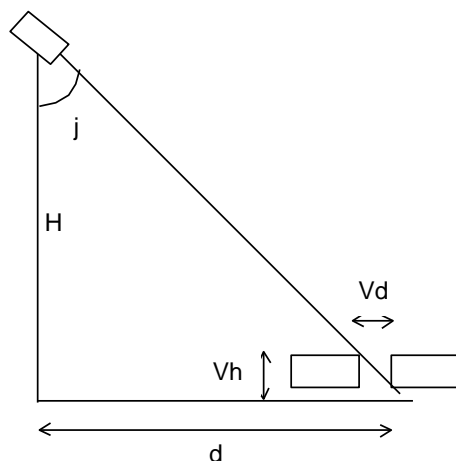


Figura 26 – Posizionamento di telecamera con illuminatore ad infrarossi (a sinistra) e principio di rilevamento video con elaborazione delle immagini mediante spire virtuali (a destra).

In assenza di pendenza, l'estensione del campo di rilevamento (d) può essere calcolata come:

$$d = H \frac{V_d}{V_h}$$

essendo H l'altezza della telecamera, V_h l'altezza dei veicoli e V_d il distanziamento spaziale osservato dalla telecamera (ottenuto proiettando orizzontalmente il segmento definito dalle intersezioni del raggio avente per origine la telecamera con l'estremità superiore del primo veicolo e con quella inferiore del secondo).

L'andamento dell'estensione del campo di rilevamento in funzione del distanziamento spaziale V_d dei veicoli e dell'altezza della telecamera è riportato nel caso delle autovetture (altezza media V_h dei veicoli pari a 1,5 m) ed nel caso dei veicoli commerciali (altezza media V_h dei veicoli pari a m).

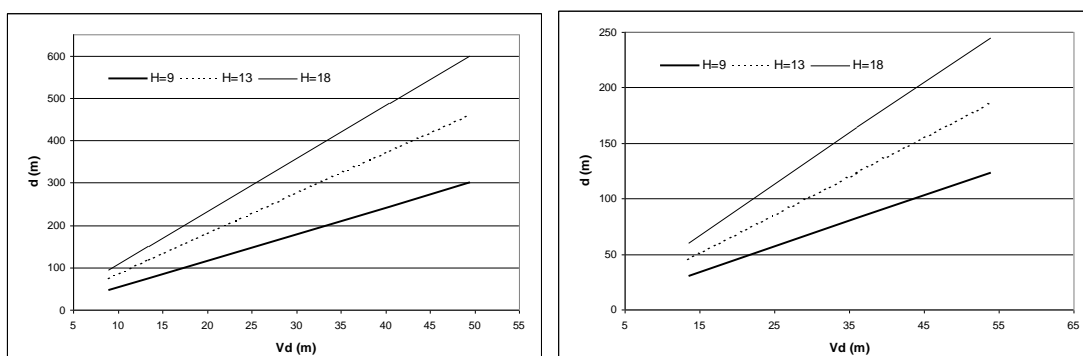


Figura 27 – Estensione del campo di rilevamento in funzione del distanziamento spaziale V_d dei veicoli e dell'altezza della telecamera nel caso delle autovetture (a sinistra) e di veicoli commerciali (a destra).

Altri fattori influenzano le prestazioni delle telecamere, 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. In caso di montaggio laterale l'altezza della telecamera deve essere almeno di 15 m; per altezze minori è richiesta una posizione centrale. In ogni caso, quanto più è bassa l'altezza di montaggio tanto maggiore è l'errore di misura della velocità poiché questo è proporzionale all'altezza del veicolo diviso per l'altezza della telecamera (V_h / H).

In linea generale, si può comunque affermare che tali sistemi garantiscono delle misure di elevata precisione ed affidabilità, tendenti a confermare le indicazioni fornite dai diversi produttori:

- Precisione di conteggio variabile tra il 85% ed il 100%;
- Tasso di errore sulla misura della velocità compreso fra il 3% ed il 10%;
- Tasso di errore sulla misura del tasso di occupazione di circa il 10%;
- Tasso di errore dell'ordine del 10% sul rilevamento della lunghezza di coda agli incroci o ai caselli di pagamento del pedaggio;
- Precisione di circa il 97% nella classificazione dei veicoli sulla base delle loro caratteristiche geometriche visibili (lunghezza e larghezza).

E' opportuno segnalare che l'applicazione di detti sistemi è notevolmente onerosa e non esclude eventuali difficoltà operative, legate essenzialmente:

- Alle condizioni meteorologiche (pioggia, neve, vento, nebbia), le quali possono alterare la leggibilità delle immagini;
- Alle condizioni ambientali (variabilità della luminosità nell'arco della giornata, presenza di ombre, effetti di abbagliamento dovuti al sole sotto certe inclinazioni);
- Agli effetti di mascheramento dovuti alla vegetazione, ai veicoli di grande sagoma, ecc.;
- Agli effetti distorcenti derivanti dalla visione prospettica delle immagini.

2.5.1.1 Il rilevamento con immagini a raggi infrarossi

Oltre alla tecnologia T.A.I. è possibile rilevare le immagini tramite dispositivi a raggi infrarossi. In questo caso le immagini sono generate dall'energia riflessa e emessa catturata dalla telecamera che opera nella banda di lunghezza prossima all'infrarosso (da 0.87 a 1.5 μm), dell'infrarosso stesso (da 3 a 5 μm) o nella banda di energia termica delle onde lunghe (da 8 a >12 μm). Le immagini del campo visibile (da 0.4 a 0.7 μm) sono formate dalla luce del sole riflessa o da quella emessa dai fari. Non appena lo spettro si sposta verso onde di

maggiore lunghezza d'onda, le immagini rilevate derivano dall'energia emessa. Le immagini nella banda di lunghezza prossima all'infrarosso appaiono simili a quelle visibili all'occhio umano, quelle nella banda di lunghezza dell'infrarosso presentano alcune caratteristiche dell'energia emessa e quelle nella banda delle onde lunghe sono prevalentemente formate dall'energia emessa dagli oggetti con una piccola componente dovuta a quella riflessa. Per questo motivo queste ultime sono poco attenuate dalla pioggia o dalla nebbia anche se attualmente non sono disponibili a costi bassi.

Le telecamere a raggi infrarossi presentano, quindi, il vantaggio di essere insensibili alle variazioni ambientali quali clima, ombre, ecc.. anche se possono comunque verificarsi fenomeni di ombre termiche dovuti al passaggio di un veicolo con un motore molto caldo.

2.5.2 SISTEMI DI SENSORI INTEGRATI (MULTITECNOLOGIA)

I sistemi multitecnologia integrano le diverse tecnologie di rilevamento per sfruttare i vantaggi di ciascuna e compensarne al tempo stesso gli svantaggi.

Un esempio di sensore integrato è rappresentato dal sistema Siemens ASIM TT266, a tripla tecnologia, costituito da:

un radar Doppler, per il rilievo delle velocità oltre i 12km/h

due infrarossi passivi per il rilievo della presenza di veicoli e delle velocità inferiori a 12km/h

un sensore ad ultrasuoni per rilievo dell'altezza e la classificazione veicolare

Questo sistema consente più accurate misure di flusso ed una migliore classificazione dei veicoli.

Il dispositivo richiede un'installazione centrale sospesa al di sopra della carreggiata, con 1 sensore per corsia, su portale o passerella; richiede inoltre un locale tecnico per l'alloggiamento della strumentazione ed alimentazione di rete elettrica.

I parametri monitorabili sono:

- Conteggio dei veicoli in transito
- Velocità e lunghezza veicoli
- Distanziamento temporale
- Presenza di veicoli fermi
- Classificazione dei veicoli (5 classi)

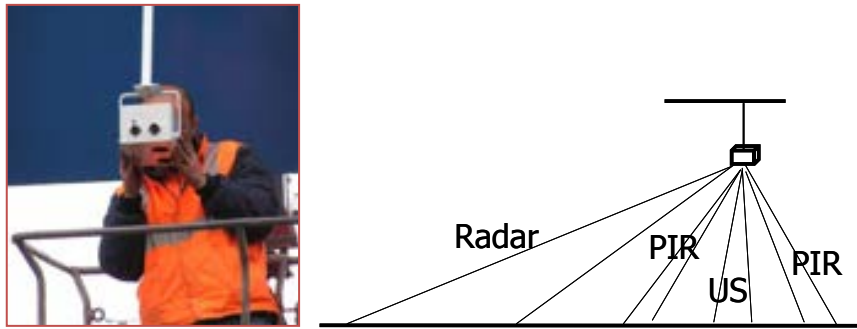


Figura 28 – Installazione del sistema ASIM TT266 e schema di integrazione delle 3 diverse tecnologie utilizzate (a destra).

2.6 Monitoraggio con sensori mobili

In corrispondenza di sezioni autostradali non attrezzate con sensori fissi, il carico di lavoro e il conseguente costo di installazione e manutenzione di rilevatori convenzionali risultano significativi e si provoca in alcuni casi la chiusura dell'infrastruttura al traffico. Si vedrà nel seguito come la tecnologia FCD sia una soluzione efficace dal punto di vista economico che può essere agevolmente integrata con sensori fissi (telecamere, spire induttive) caratterizzati da alti costi di installazione e manutenzione.

L'impiego di rilevatori mobili del traffico presenta inoltre una maggiore flessibilità poiché i cambiamenti nelle informazioni che i veicoli forniscono o negli algoritmi che usano tali informazioni sono pressoché a costo nullo.

L'affidabilità delle stime delle variabili di traffico e degli indicatori di prestazione è fortemente legata alla percentuale dei veicoli equipaggiati in movimento ed alla frequenza di registrazione e trasmissione dei dati GPS.

I dati provenienti dal sistema possono essere sottoposti a tecniche di filtraggio e stima e possono essere ottenute informazioni di interesse per gli utenti (velocità e tempi di percorrenza), i quali possono adattare il proprio percorso di viaggio o ottenere un migliore inquadramento della mobilità sull'infrastruttura su cui si muovono.

L'adozione delle floating car rappresenta una via efficace per raggiungere stime accurate dei tempi di percorrenza in una rete stradale, consentendo inoltre di aggiornare la conoscenza sulle condizioni di traffico.

2.6.1 SCHEMA DI MONITORAGGIO DEL TRAFFICO CON SENSORI MOBILI

In un sistema informativo del traffico basato su tecnologia FCD, si scambiano informazioni tra la flotta di veicoli e un sistema centrale di elaborazione dei dati: i veicoli, che fungono da *clients*, inviano periodicamente i dati recentemente accumulati su posizione e velocità istantanea a un server che gestisce un database spaziale rappresentativo della rete stradale oggetto di analisi.

Il server elabora le informazioni ricevute ed effettua il tracciamento dei veicoli sugli archi stradali, mettendo in correlazione le informazioni di posizione di ciascun veicolo con il grafo della rete. I sensori utilizzati per il posizionamento veicolare sono caratterizzati da un

certo errore di misura che, se si sommano durante il percorso, riducono sensibilmente l'accuratezza delle stime. Per sopperire a questo inconveniente viene utilizzato il map matching: una tecnica di correzione delle misure di localizzazione dei sensori mediante mappe digitali.

Un algoritmo di map matching correla la posizione individuata attraverso i sensori con le coordinate della rete stradale comparando la traiettoria del veicolo con i percorsi presenti su una mappa digitale. Lo spostamento viene costantemente comparato con i percorsi disponibili e viene posizionato il veicolo sull'arco più probabile.

La frequenza con cui vengono scambiate le informazioni dipende generalmente dalla risoluzione richiesta di dati e dal metodo di comunicazione.

Le più comuni e utili informazioni ottenibili sono il tempo medio di percorrenza e velocità medie di percorso o di sezione stradale; vari approcci sono stati proposti per sviluppare tecniche FCD in grado di prevedere condizioni di traffico nel breve termine, rilevare automaticamente incidenti o situazioni critiche e determinare flussi origine-destinazione.

L'affidabilità delle stime di tempi di percorrenza dipende essenzialmente dalla percentuale di veicoli sonda che partecipano al flusso di traffico: per un basso livello di penetrazione, altri fattori che influenzano l'affidabilità delle stime sono le condizioni di traffico e la capacità della strada. Di norma, un basso tasso di penetrazione di veicoli sonda è richiesto in condizioni di traffico congestionato, mentre una percentuale più alta è richiesta per condizioni di traffico maggiormente fluide.

In Figura 29 è fornita una rappresentazione schematica delle componenti tecnologiche del sistema: un dispositivo di rilevamento della posizione (GPS), un dispositivo di trasmissione (telefono cellulare) e un sistema centrale di elaborazione che si interfaccia con ambienti esterni.

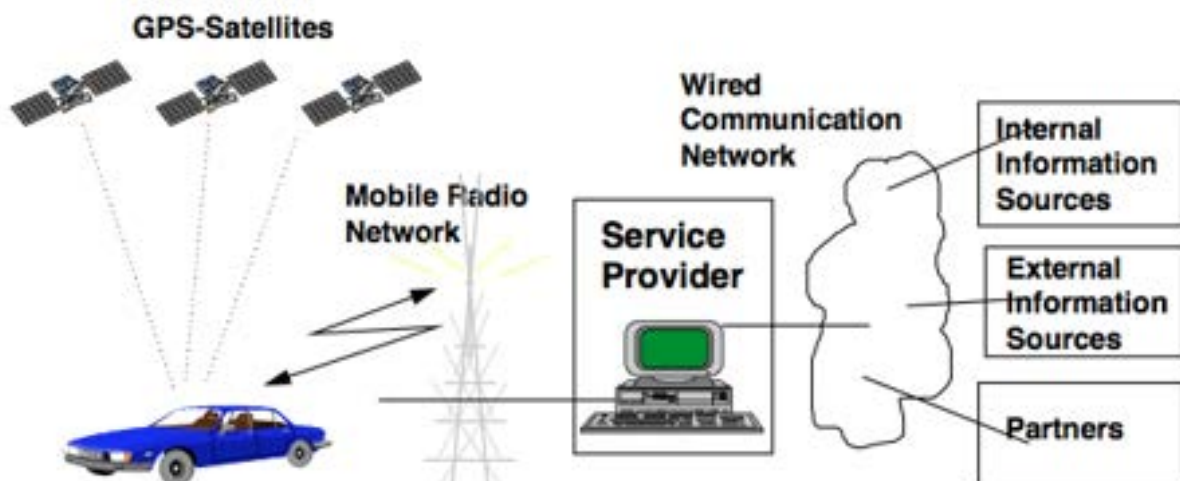


Figura 29 – Componenti e interazioni di un sistema FCD

2.6.2 ORGANIZZAZIONE DEL SISTEMA

Si consideri un'infrastruttura autostradale, composta da n archi, su cui si muove una aliquota a del traffico totale di veicoli sonda equipaggiati con un computer di bordo e dispositivi di misura e di comunicazione con *stazioni base*, ciascuna delle quali collegata al centro di gestione del traffico (TMC) attraverso una robusta e fitta rete di comunicazione. Utilizzando dati di posizione provenienti dal GPS, un odometro e sistemi di direzione inerziale, i veicoli aggiornano ricorsivamente le stime della propria posizione sull'autostrada.

I dati comunicati alle stazioni contengono l'identificativo del veicolo, la posizione, la velocità e il tempo impiegato per attraversare l'arco precedente a quello su cui si trova il veicolo al momento della trasmissione.

Questi dati possono essere utilizzati per calcolare stime delle variabili macroscopiche del traffico e tempi di percorrenza d'arco, che sono a loro volta utilizzate dal TMC per elaborare report di velocità, previsioni dei tempi di percorrenza e misure di controllo raccomandate che possono essere fornite agli utenti. Una rappresentazione schematica dello scenario di stima/previsione è fornita in Figura 30.

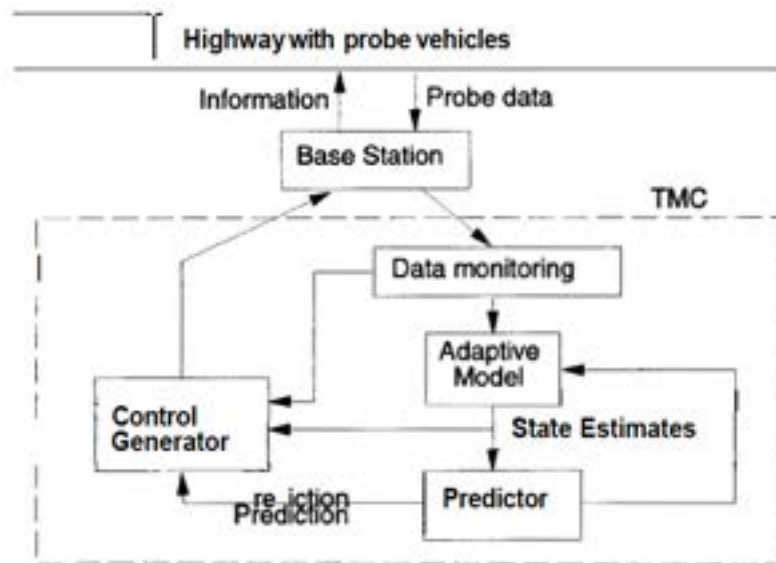


Figura 30 – Schematizzazione del sistema di monitoraggio e controllo

La conoscenza dello stato in cui versa la rete può essere organizzato a livello d'arco e ad un livello superiore corrispondente al TMC. Le informazioni che devono essere immagazzinate per ogni arco includono velocità, tempo di percorrenza, numero e rispettive posizioni dei veicoli sonda; d'altra parte il TMC ha bisogno di gestire informazioni ad un livello superiore quali la configurazione della rete e i possibili percorsi origine-destinazione, previsioni dei tempi di percorrenza, velocità dei differenti percorsi. Nella pratica, il TMC deve essere a conoscenza di altre utili informazioni di cui gli incidenti e la loro durata sono un esempio.

2.6.3 LOCALIZZAZIONE DEI VEICOLI SONDA

La problematica principale, che deve essere affrontata nella messa a punto di un sistema che utilizzi i veicoli come sorgente di dati, è quello della misura; la velocità del veicolo può essere determinata utilizzando l'odometro così come la misura del tempo di percorrenza tra due punti noti può essere banalmente ottenuta dalla differenza tra gli istanti di passaggio del veicolo per tali località. Dunque, il punto cruciale del problema di misura consiste nell'ottenere informazioni sulla posizione dei veicoli. Il Global Positioning System, meglio noto come GPS (a sua volta abbreviazione di NAVSTAR GPS, acronimo di NAVigation Satellite Time And Ranging Global Positioning System), è un sistema di posizionamento e navigazione satellitare che fornisce posizione ed orario in ogni condizione meteorologica, ovunque sulla Terra, o nelle sue immediate vicinanze, ove vi sia un contatto privo di ostacoli con almeno quattro satelliti del sistema. Il suo grado attuale di accuratezza è dell'ordine dei metri, in dipendenza dalle condizioni meteorologiche, dalla disponibilità e dalla posizione dei satelliti rispetto al ricevitore, dalla qualità e dal tipo di ricevitore, dalla riflessione del segnale, dagli effetti della ionosfera, della troposfera e della relatività. Nonostante il GPS sia in grado di fornire delle stime accurate per un ricevitore stazionario nel tempo, l'accuratezza per un ricevitore mobile è piuttosto limitata.

Bisogna aggiungere che il normale sistema GPS è soggetto a un certo margine di errore di circa 3-5 metri; anni fa, il Ministero della Difesa americano "aggiungeva" volutamente un certo errore ai dati GPS, riservandosi di sfruttarne la massima precisione. L'errore introdotto da questo sistema poteva essere di decine di metri. Da qualche anno tale politica è cambiata e il GPS è ricevibile alla massima precisione. Il GPS differenziale (Figura 31) permette ai ricevitori GPS, che sono compatibili a questa tecnologia, di migliorare la precisione di geolocalizzazione, trasferendo a questi dispositivi i dati per correggere il segnale inviato dal sistema GPS.

Per ottenere una precisione massima (dell'ordine del centimetro), esistono postazioni fisse la cui posizione è stata determinata per via geodetica e con altri mezzi con la massima precisione. Queste postazioni ricevono il segnale GPS e "si accorgono" dell'errore della posizione comunicata dal GPS. L'errore viene comunicato via radio a speciali apparecchi GPS in grado di riceverlo, che potranno così correggere l'errore originario della misura fatta tramite i satelliti.

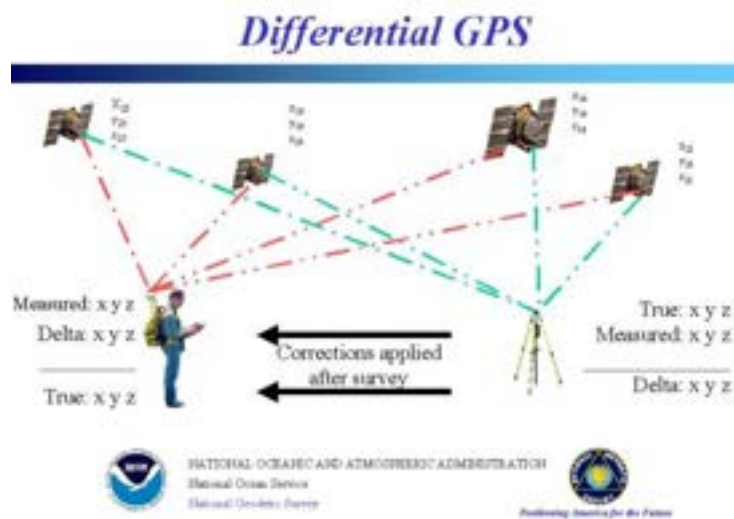


Figura 31 – Funzionamento del GPS differenziale

Le correzioni sono trasmesse ai ricevitori (veicoli sonda) che le utilizzano per ottenere una stima della posizione: l'accuratezza ottenibile per il rilevamento di un veicolo fermo è di circa 5 cm (con una frequenza di 2Hz), mentre per un veicolo in moto è pari all'incirca alla distanza percorsa in 0.5s. I valori indicati sono adeguati per l'impiego di veicoli in spazi aperti; l'accuratezza del dato potrebbe, infatti, subire un decadimento in presenza di ostruzioni, che comportano la perdita del segnale.

Un approccio alternativo, che richiede un maggiore investimento, è l'adozione di un sistema basato su un certo numero di radiofari sistemati in diverse posizioni dell'infrastruttura lungo i percorsi di interesse; in questo modo, conoscendo le posizioni dei trasmettitori, i veicoli possono ottenere l'informazione sulla loro posizione con un alto grado di precisione.

In generale, si tratta di sistemi più costosi del GPS a causa dell'installazione hardware e dei costi di posizionamento/pianificazione dei trasmettitori, ma che consentono informazioni affidabili; soluzioni del genere sono state sperimentate in alcuni paesi lungo percorsi effettuati da autobus o taxi e hanno consentito un grado di accuratezza di circa 5m.

In molte applicazioni in cui possono verificarsi delle ostruzioni al segnale o in situazioni in cui è richiesto un elevato livello di accuratezza, potrebbe essere necessario ricorrere a un approccio che prevede l'uso integrato di sensori inerziali e del GPS.

Un *sistema di navigazione inerziale* è un ausilio alla navigazione che utilizza un computer e dei sensori di moto per tracciare la posizione, l'orientamento e la velocità (direzione, verso e modulo) di un veicolo; le componenti sono un calcolatore e una piattaforma o modulo che contiene degli accelerometri, dei giroscopi, od altri dispositivi sensibili al moto. Il sistema è inizialmente fornito della sua velocità e posizione da un'altra sorgente (un operatore, un ricevitore satellitare GPS, etc.), e dopo di ciò calcola la sua posizione aggiornata e velocità integrando le informazioni che ha ricevuto dai sensori di moto.

La soluzione descritta è applicabile su molti tipi diversi di veicoli, inclusi gli aeroplani, i sottomarini, ed i missili guidati. Tuttavia, il loro costo e la loro complessità pongono una limitazione alla destinazione per la loro pratica utilizzazione.

Un sistema inerziale può rivelare una variazione della sua posizione geografica, della sua velocità e del suo orientamento (rotazione attorno ad un asse).

2.6.4 METODI DI COMUNICAZIONE

Nelle aree metropolitane, in cui circolano milioni di veicoli, è richiesta una grande mole d'informazioni e di comunicazioni tra server e veicoli, determinando in tal modo problemi di costi di comunicazione e sovraccarichi sul server che deve processare tutti i dati trasmessi; è per tale ragione che il sistema risulta difficile da estendere su larga scala.

Una possibile soluzione potrebbe essere quella di ridurre le trasmissioni al server, cosa che potrebbe influenzare l'accuratezza dei dati se il numero di informazioni scambiate vengono diminuite indiscriminatamente; l'alternativa è la randomizzazione: ogni veicolo ha una probabilità di inviare i report di velocità al server. L'efficienza del sistema dipenderà da com'è costruita la probabilità di trasmissione e da come il server aggiorna il suo database.

Dal punto di vista dell'architettura del sistema, esistono diverse modalità per costruire un sistema di monitoraggio del traffico basato sull'uso di veicoli sonda; nella prima, che utilizza la strategia *client/server*, i veicoli inviano individualmente le velocità misurate al server, che in tal modo viene informato sulle reali condizioni di traffico di ogni sezione stradale; successivamente il sistema centrale elabora le informazioni e invia l'aggiornamento delle velocità di ogni tronco della rete a tutti i veicoli.

Un'altra modalità è quella rappresentata dall'architettura *peer to peer* (P2P), in cui le informazioni di velocità sono scambiate direttamente tra un veicolo e l'altro.

Kerner et al hanno sviluppato un sistema informativo basato su architettura *client/server*, in cui il sistema centrale invia le velocità coi rispettivi valori di soglia: ogni veicolo invia un aggiornamento della velocità, se il valore misurato sulla sezione stradale che sta percorrendo differisce da quello inviato dal server di un valore maggiore della soglia.

Goel et al hanno considerato un sistema basato su architettura P2P, in cui i veicoli si inviano tra loro le velocità misurate utilizzando un metodo di comunicazione ampiamente diffuso, quale messaggio di testo da telefoni cellulari.

Shinkawa et al hanno sviluppato un'architettura P2P utilizzando autobus che viaggiano su percorsi prestabiliti in grado di inviare informazioni sulle condizioni di traffico a gruppi disconnessi di clients.

Quelle appena accennate rappresentano solamente alcuni esempi per ridurre i costi di comunicazione, diminuendo la frequenza di trasmissione o il volume di dati da trasmettere.

2.7 Strategie di aggiornamento del sistema centrale

Il sistema centrale e i veicoli hanno lo stesso grafo della rete stradale, in cui ogni segmento è definito come la sezione di strada compresa tra due intersezioni o tra due rampe di uscita di un'autostrada.

Per ogni segmento si ha una velocità corrente v_m ottenuta semplicemente dividendo la lunghezza della sezione per il tempo che il generico veicolo impiega per attraversarla; tale velocità è calcolata nel momento in cui il veicolo raggiunge la fine del segmento ed in tale istante viene inviata al server che successivamente ne dà informazioni agli altri veicoli sonda, i quali possono ricalcolare, ad esempio, il restante tempo di percorrenza che li conduce alle rispettive destinazioni.

Naturalmente, la velocità del singolo veicolo non è sufficiente per aggiornare la velocità della sezione nel database centrale, per cui si rendono necessari delle osservazioni multiple per determinare un valore reale, rappresentativo delle reali condizioni di deflusso sulla sezione.

Il sistema centrale deve raccogliere diverse misure di velocità per ogni sezione per essere in grado di aggiornare la stima di velocità con una certa affidabilità; per tale motivo il periodo di servizio è suddiviso in intervalli costanti, detti *intervalli di raccolta*, in ognuno dei quali il server dovrà acquisire reports multipli dai veicoli per ogni segmento stradale. Alla fine di ogni intervallo il server esegue una media dei valori ricevuti per ogni segmento ed aggiorna la velocità corrente sulla base del valor medio.

Sia k il numero di osservazioni di velocità che il sistema centrale si aspetta di ricevere durante un generico intervallo di raccolta su un segmento: k può essere costruito in modo tale che la velocità media calcolata si discosti dalla velocità media attuale di un determinato errore percentuale e con fissato intervallo di confidenza. Tale metodo può essere adottato quando sia nota la varianza dei dati.

Sia v_b la velocità media calcolata per un segmento: per aggiornare l'informazione sulla velocità dei veicoli dinamicamente, il server diffonde continuamente la velocità v_b di ogni segmento.

Al fine di ridurre i costi di comunicazione tra veicoli e sistema centrale, si possono adottare alcune strategie di aggiornamento del sistema centrale.

I. Strategia deterministica

Kerner et al hanno sviluppato un sistema di comunicazione del tipo client/server che utilizza un valore soglia di velocità T , al fine di evitare la trasmissione di dati di velocità quando la differenza tra quelle computate dal server e quelle misurate dai veicoli è sufficientemente piccola.

Il criterio di trasmissione può essere espresso nel modo seguente:

$$|v_m - v_b| \geq T,$$

ovvero il veicolo trasmette v_m al server se e solo se la differenza tra la velocità diffusa dal sistema centrale, ottenuta come media delle osservazioni precedenti e immagazzinata nel database, e il valore misurato eccede la soglia T .

II. Strategia information-cost

Tanizaki e Wolfson hanno elaborato un metodo di aggiornamento basato sulla trasmissione di dati in maniera casuale; si utilizza, infatti, una funzione randomizzata per ridurre lo scambio di informazioni ridondanti.

La strategia funziona allo stesso modo di quella deterministica ad eccezione del fatto che, quando il criterio di trasmissione è soddisfatto, invece di inviare v_m con probabilità unitaria, la tecnica consente di inviare dati con una data probabilità di trasmissione p , che dovrebbe essere determinata in modo da massimizzare l'accuratezza dei dati inviati dal server con un numero minimo di trasmissioni.

È stato sviluppato un modello per studiare la relazione di compromesso tra il costo della comunicazione e l'incertezza dei dati: tale compromesso deriva dal fatto che quanto maggiori sono le comunicazioni coi veicoli minore è l'incertezza dei dati; pertanto, auspicando una riduzione dei costi di trasmissione dei dati, si accumulerà una incertezza dei dati trasmessi dal sistema centrale.

Gli autori hanno formulato un costo totale dell'informazione, dato dalla somma del costo della comunicazione e dal costo derivante dall'incertezza, e risolto il problema in termini di probabilità di trasmissione, minimizzando il costo totale dell'informazione.

Entrambe le strategie sono problematiche e ciò dipende proprio dal modo in cui è definito il criterio di trasmissione dell'informazione, che non riesce a tenere conto della varianza della velocità da un veicolo all'altro.

L'informazione che è inviata al server, quando il criterio è soddisfatto, è incompleta, poiché il sistema centrale non riceverà nessun punto dell'intervallo $v_b - T, v_b + T$; pertanto ne deriva un valore medio della velocità, calcolato dal sistema ed immagazzinato nel database centrale, inaccurato con entrambe le strategie introdotte.

Inoltre il criterio permette di inviare più dati di quanti siano effettivamente necessari: si potrebbe costruire uno schema in cui la velocità media sia calcolata con un certo errore percentuale definito da un dato intervallo di confidenza. In tale schema risolutivo, l'ampiezza del campione che garantisce la confidenza nota può essere agevolmente stimata e non vi è più alcuna esigenza di inviare al server più di k osservazioni, se si aspira ad una riduzione dei costi di comunicazione.

III. Strategia a flusso

Per ovviare alle problematiche delle strategie precedenti, non si utilizza il criterio di trasmissione e i veicoli hanno tutti la stessa opportunità di comunicare col server,

indipendentemente dalla loro velocità ed il sistema non corre il rischio di ricevere informazione incomplete.

I veicoli sonda utilizzano una *probabilità di trasmissione*, costruita in modo tale che il numero atteso di messaggi inviati al server sia pari a k , che è data da:

$$p = k N,$$

dove k è il numero di messaggi che il sistema centrale deve ricevere dai veicoli per garantire un determinato intervallo di confidenza nel calcolo della velocità media e N è una stima del flusso di veicoli che attraversano la generica sezione stradale in un intervallo di raccolta.

Si vedrà ora nel dettaglio come determinare la probabilità di trasmissione.

Sia X una variabile aleatoria, con media μ e varianza σ^2 , che rappresenta la velocità di un veicolo su un segmento stradale in un intervallo di raccolta. Per il teorema del limite centrale, la velocità media X è distribuita normalmente con media μ e varianza σ^2 / N ; allora si ha che, se è richiesto un intervallo di confidenza pari a $100(1 - \alpha)\%$ per la velocità media μ con errore massimo di stima ε , allora la velocità media ricade nell'intervallo $\mu - \varepsilon, \mu + \varepsilon$. L'ampiezza del campione è pari a:

$$k = \frac{z_{\alpha/2}^2 \sigma^2}{\varepsilon^2},$$

dove $z_{\alpha/2} = \Phi^{-1}(1 - \alpha/2)$ e Φ^{-1} rappresenta l'inversa della funzione cumulata di distribuzione normale. la varianza è ignota ai veicoli e sarà determinata sulla base di serie storiche di dati.

Prima di derivare l'espressione di N , si richiama l'equazione di stato:

$$\mathbf{flusso} = \mathbf{densità} * \mathbf{velocità}.$$

Il generico veicolo per calcolare il flusso deve conoscere densità e velocità. La densità non è nota ai veicoli e le uniche velocità che conoscono sono la propria e quella che il server spedisce a tutti i veicoli, v_b (velocità media del segmento nel precedente intervallo di raccolta).

Come noto, sono presenti diverse formulazioni in letteratura che consentono di ricavare il flusso per il tramite delle curve di deflusso flusso-velocità, ma in realtà questi modelli empirici stimano il flusso sulla base di una velocità media. Per tale ragione i veicoli potranno utilizzare i modelli con la velocità v_b , unica velocità media che essi possiedono, e ottenere una stima del flusso nel precedente intervallo di raccolta.

Il flusso di traffico nell'intervallo corrente N coincide con la stima nell'intervallo precedente se si assume che non vi siano drastiche variazioni delle condizioni di traffico da un periodo all'altro.

Si supponga ora di utilizzare il modello di Greenshields; dopo semplici passaggi analitici si giunge alla relazione velocità flusso, che per il caso in esame si esprime come:

$$q = k_j v_b (1 - v_b / v_f).$$

Il flusso è nullo quando il traffico è bloccato ($v_b = 0$) e in regime di flusso incondizionato ($v_b = v_f$). A partire dall'equazione precedente, detta τ la lunghezza dell'intervallo di riferimento, si ottiene:

$$N = q * \tau,$$

e, di conseguenza, la probabilità di trasmissione p . A questo punto i veicoli trasmetteranno le informazioni con probabilità p : quando un veicolo raggiunge la fine di un segmento, vengono calcolati k e N ed il veicolo invia il messaggio con probabilità k/N .

Utilizzando il concetto di probabilità, il numero atteso di messaggi inviati al server sarà prossimo a k quando la stima N è prossima al flusso attuale di veicoli durante il generico intervallo di raccolta.

2.8 Prestazioni del sistema

Si ricorre in genere a modelli di simulazione per dedurre delle conclusioni numeriche sulle prestazioni offerte dal sistema, data la molteplicità dei fattori in gioco; si preferisce, infatti, evitare il ricorso a caratterizzazioni puramente analitiche, poiché l'evoluzione della velocità nel tempo è governata da complessi fenomeni dinamici. L'accuratezza delle stime ottenute da dati di veicoli sonda dipende essenzialmente dal numero di veicoli circolanti, dalla frequenza dei report f_R inviati dai veicoli al server, dal contenuto del report e dall'algoritmo utilizzato per ottenere le stime.

Per analizzare le prestazioni, si usa simulare il deflusso di veicoli sonda su un'infrastruttura autostradale attraverso un modello in cui si utilizzeranno i reports per prevedere i futuri tempi di percorrenza. Si otterrà una variazione dell'accuratezza dei risultati variando opportunamente i parametri del modello.

Prima di descrivere, nel dettaglio, un particolare modello sviluppato dall'Institute of Transportation Studies (ITS) dell'Università della California nell'ambito del programma PATH (Partners for Advanced Transportation Technology), sarà presentata una metodologia di valutazione della velocità media d'arco, da dati puntuali di floating car.

2.8.1 STIMA DELLA VELOCITÀ D'ARCO

Si consideri la velocità media d'arco, intesa come variabile macroscopica del traffico sul generico segmento j , come una funzione dello spazio e del tempo, $v_j(t)$, dove $j = 1, 2, \dots, n$ e sia $[0, T]$ l'intervallo di riferimento. Siano, inoltre, la velocità e posizione dell' i -esimo veicolo sonda anch'esse funzioni del tempo, $v_s^i(t)$ e $x_s^i(t)$. Le velocità medie e quelle delle floating car sono legate dalla seguente relazione:

$$v_s^i(t) = v_j(t) + Z_i(t),$$

dove la funzione $l: R \rightarrow 1, 2, \dots, n$ traccia la posizione dei veicoli sull'arco e $Z_i(t)$ interpreta un processo casuale che rappresenta la deviazione della velocità del veicolo i all'istante t dal valore ottenibile considerando il flusso totale.

L'obiettivo della procedura di valutazione è ottenere stime $v_{j,t}$ di $v_{j,t}$ per $j = 1, 2, \dots, n$, a partire da misure istantanee di $v_s^i(t)$ e $x_s^i(t)$ agli istanti $t \in t_1, t_2, t_3, \dots$; il problema risulta di difficile soluzione anche in forma discreta per cui si rendono necessari alcuni vincoli e ipotesi.

Si consideri una discretizzazione temporale, per cui, nell'intervallo k , la velocità nella sezione j è denotata con $v_j(k)$; si hanno a disposizione $n_d(k)$ misure $v_s^1, v_s^2, \dots, v_s^{n_d}$ riportate dai veicoli nella sezione j e la velocità v_s^i è data dalla somma di $v_j(k)$ e di un rumore statistico $Z_i(k)$.

$$v_s^i = v_j(k) + Z_i.$$

A questo punto il problema consiste nella determinazione della stima $v_j(k)$ di $v_j(k)$.

Si assume ora l'ipotesi che la variazione della velocità d'arco da un intervallo all'altro sia limitata e, in assenza di ulteriori informazioni, è fornito da:

$$v_j(k) = v_j(k-1) + \eta(k),$$

dove $\eta(k)$ è una sequenza di variabili casuali indipendenti e identicamente distribuite; si ammette inoltre che la stima nell'intervallo precedente sia nota e che $Z_i(k)$ sia un rumore gaussiano bianco a media nulla, ovvero sia indipendente dal tempo e dai reports dei differenti veicoli.

Si ottiene allora:

$$v_j(k) = (1 - \alpha(k)) v_j(k-1) + \alpha(k) \frac{1}{n_d(k)} \sum_{i=1}^{n_d} v_s^i.$$

Si sceglierà $\alpha(k)$ in modo da minimizzare l'errore quadratico medio $E [v_j(k) - v_j(k)]^2$; indicando con $\epsilon_j(k)$ il k -esimo errore, si può scrivere:

$$\epsilon_j(k) = v_j(k) - v_j(k),$$

pertanto si deduce:

$$v_j(k-1) = v_j(k) - \eta(k) + \epsilon_j(k-1),$$

$$v_s^i = v_j(k) + Z_i.$$

Ciò implica che:

$$\epsilon_j(k) = (1 - \alpha(k)) \epsilon_j(k-1) - \eta(k) + \alpha(k) \frac{1}{n_d(k)} \sum_{i=1}^{n_d} Z_i.$$

Denotando le varianze di $\epsilon_j(k)$, $\eta(k)$ e Z_i rispettivamente con $\sigma_{\epsilon_j}^2$, σ_{η}^2 e σ_Z^2 si ottiene:

$$\sigma_{\epsilon_j}^2(k) = (1 - \alpha(k))^2 \sigma_{\eta}^2 + \sigma_{\epsilon_j}^2(k-1) + \alpha^2(k) \frac{\sigma_Z^2}{n_d},$$

il valore di $\alpha(k)$ da scegliere è allora:

$$\alpha_k = \frac{\sigma_\eta^2 + \sigma_{\varepsilon_j}^2(k-1)}{\sigma_\eta^2 + \sigma_{\varepsilon_j}^2(k-1) + \frac{\sigma_z^2}{n_d}}$$

Le stime di velocità d'arco calcolate col metodo appena illustrato sono ottime per il criterio di minimizzazione dell'errore quadratico medio; si tratta quindi di stime bayesiane.

Ulteriori miglioramenti possono essere raggiunti modellando la dipendenza di $\eta(k)$ su $v_j k$, ma al costo di un maggiore onere computazionale.

2.8.2 VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI

Per simulare il comportamento della corrente di veicoli, il modello dell'ITS utilizza come input i profili di velocità, che possono essere ricostruiti dai rilievi oppure dai modelli macroscopici del deflusso.

Una volta assegnati i flussi origine-destinazione, i veicoli sono introdotti nel sistema con destinazioni preassegnate e con velocità ottenute tramite una perturbazione sistematica della velocità media della sezione su cui si trovano i veicoli, utilizzando una distribuzione di probabilità triangolare a media nulla.

Appena i veicoli cominciano a viaggiare sull'infrastruttura, i dati richiesti (velocità, posizione e tempi di viaggio) sono registrati e inviati ad un modulo che rappresenta una stazione di monitoraggio della rete, che esegue una valutazione dello stato di traffico e dei futuri tempi di percorrenza; il modulo è anche responsabile del rilevamento di eventuali incidenti e dell'identificazione delle decisioni di istradamento dei veicoli sui vari percorsi definiti da coppie multiple origine-destinazione.

L'algoritmo di simulazione legge la configurazione della rete di studio, i parametri di simulazione e i dati di flusso e velocità forniti dagli utenti; il modello è in grado di generare veicoli sonda che si muovono col flusso, mantenere traccia dei loro movimenti e ottenere dati che le sonde riportano mediante trasmissioni radio.

Il monitoraggio del sistema inizia con l'impostazione iniziale di alcuni parametri del deflusso e, utilizzando le informazioni provenienti dai veicoli sonda, aggiorna le stime ed esegue previsioni dei futuri tempi di percorrenza; inoltre, sulla base dei tempi di viaggio passati, può adattare i suoi parametri per ridurre gli errori delle previsioni.

Per valutare le prestazioni del sistema in termini di dati riportati, quota di veicoli sonda impiegata e frequenza dei report, si considerano due casi:

- I veicoli inviano la propria posizione e velocità periodicamente, mentre l'algoritmo, utilizzando i dati di velocità delle sonde in ogni sezione stradale, aggiorna le stime di velocità nelle rispettive sezioni;
- I veicoli riportano i tempi di percorrenza d'arco, mentre il TMC e la stazione base aggiornano le stime dei tempi di percorrenza per quegli archi sui quali sono disponibili misure provenienti dai veicoli sonda.

I due casi devono essere considerati separatamente. Nel caso 1) la stima è sincrona poiché i veicoli trasmettono dati ad intervalli regolari e l'aggiornamento può essere effettuato alla frequenza dei report utilizzando l'approccio descritto nel paragrafo precedente.

Nel caso 2) si tratta di un aggiornamento asincrono, poiché può essere effettuato soltanto quando il veicolo ha terminato di percorrere una data sezione stradale.

La rete oggetto della simulazione è il tronco dell'autostrada I-880 della California, tra le uscite Marina e Whipple, suddivisa in 21 sezioni; i dati di flusso e velocità, ottenuti dai rilievi condotti nell'ambito di uno studio precedente, sono utilizzati dal modello per simulare il movimento di veicoli sonda. La previsione è condotta per valori differenti dei parametri (p_f , f_R) e in entrambi i casi sono calcolati gli errori quadratici medi previsti come scostamento dei valori delle grandezze da quelli ottenibili dalle misure di velocità disponibili.

La Figura 32 mostra l'andamento dell'errore per il caso 1) al variare della frequenza di trasmissione f_R , espressa come numero di trasmissioni al minuto per veicolo.

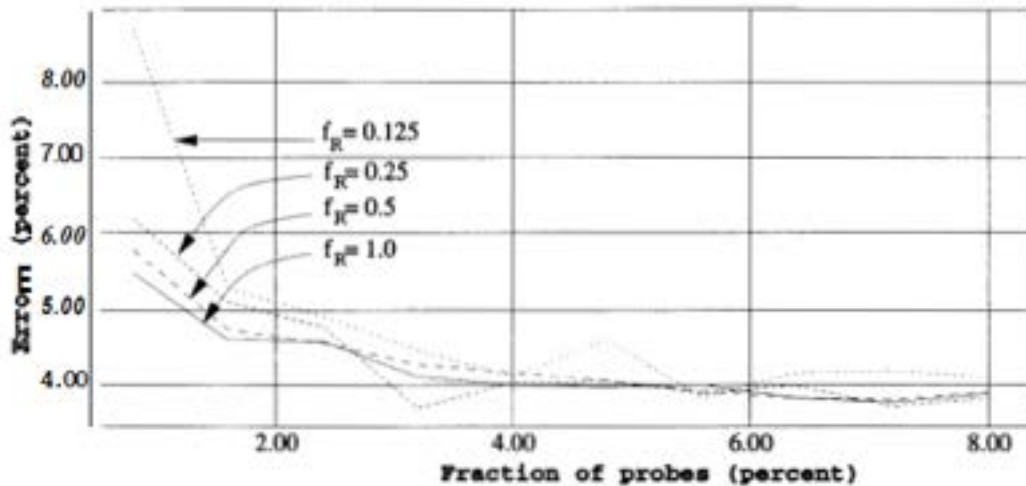


Figura 32 – Andamento dell'errore quadratico medio di velocità in funzione della quota di veicoli sonda

Per il caso 2), l'errore di previsione dei tempi di percorrenza è indicato in Figura 33.

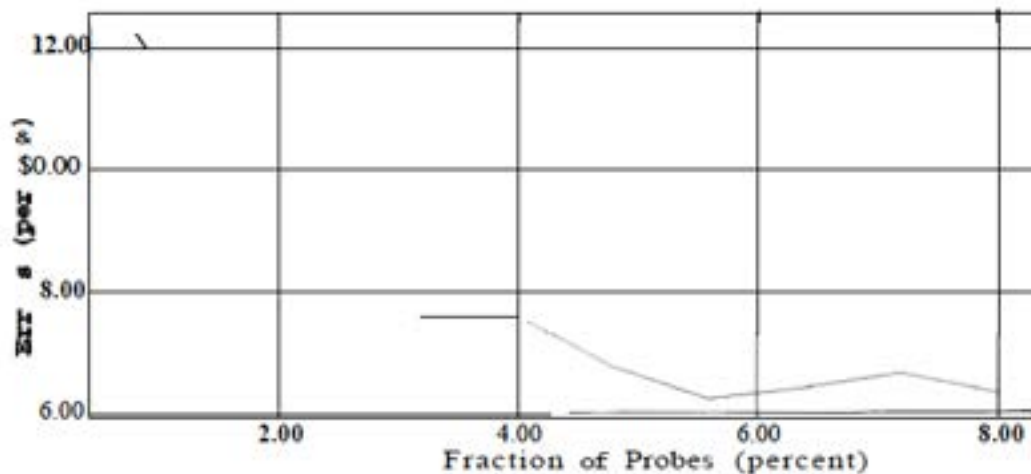


Figura 33 – Andamento dell'errore quadratico medio del tempo di percorrenza in funzione della quota di veicoli sonda

2.8.3 CONFRONTO CON I RILEVATORI FISSI

Le misure di velocità sono generalmente effettuate mediante dei circuiti induttivi, posizionati al di sotto della superficie stradale, i quali richiedono rilevanti costi di installazione e una manutenzione periodica al fine di ottenere misure affidabili delle variabili di traffico.

Le velocità registrate dai veicoli sonda sono usate per aggiornare le stime correnti in ogni sezione e possono essere confrontate con le velocità che vengono rilevate tramite sensori fissi.

Per esprimere un giudizio sul grado di precisione con cui le stime approssimano le velocità correnti, una misura d'imperfezione della stima può essere la variazione quadratica media tra le velocità ottenute utilizzando i veicoli sonda e quelle misurate coi sensori fissi; dette v_m e v rispettivamente le velocità misurate con rilevatori fissi e con veicoli sonda, l'indice di prestazione risulta:

$$R_{fit}^v = 1 - \frac{E(v - v_m)^2}{E v_m^2},$$

e può tendere al più all'unità all'aumentare della qualità della stima.

In generale, l'accuratezza migliora all'aumentare del numero di veicoli sonda impiegati e della frequenza di report. Quest'ultima considerazione è giustificata dal punto di vista numerico in Tabella 2, in cui si leggono i valori ottenuti dal modello di simulazione sviluppato dall'ITS.

Tabella 2 – Indice di prestazione al variare della quota di penetrazione degli veicoli sonda e della frequenza di trasmissione

percent probes	0.8	1.6	2.4	3.2	4.0	4.8	5.6	6.4	7.2	8.0
with $f_R = 1$	.972	.976	.977	.979	.980	.981	.982	.983	.984	.984
with $f_R = 0.5$	.967	.972	.974	.976	.978	.978	.980	.980	.981	.982
with $f_R = 0.25$	.963	.971	.971	.974	.977	.977	.978	.977	.979	.979
with $f_R = 0.125$	.951	.966	.964	.970	.972	.974	.974	.975	.977	.975

2.9 Limiti e benefici

Il monitoraggio del traffico con tecnologia FCD è divenuto, nel corso degli ultimi anni, un utile strumento della ricerca nel campo dei trasporti per tre ragioni principali:

- i nuovi servizi di mobilità, che devono fornire informazioni in tempo reale agli utenti, richiedono tale tipo di dati che non si possono ottenere con altre tecnologie quali cicli induttivi, sensori infrarossi o telecamere sul traffico. Lo sviluppo dei dispositivi di ausilio alla navigazione ha posto la necessità di una crescente richiesta di conoscenza di informazioni reali e aggiornate sui tempi di viaggio, non osservabili coi metodi di rilievo convenzionali;
- la congestione è un fenomeno che affligge sempre di più le città e, nella maggior parte dei casi, la limitata disponibilità di risorse per l'investimento in nuove infrastrutture, pone dei quesiti relativi all'individuazione di metodi e tecniche alternativi per la gestione della mobilità;
- sempre più operatori di flotte utilizzano tecniche di posizionamento per coordinare e gestire i propri veicoli, realizzando tipologie di sistemi FCD che presentano spesso dei costi addizionali pressoché nulli.

La qualità dei rilevatori mobili non è stata ancora estensivamente analizzata; la grande sfida è quella di riuscire a rappresentare gli stati di traffico di una corrente di veicoli utilizzandone solamente una quota parte, contrariamente a quanto fatto da altre tipologie di sensori.

Il principale limite consiste invece nell'incapacità del campione di veicoli di rappresentare le reali condizioni di traffico e di ottenere informazioni affidabili dei tempi di percorrenza su percorsi ricostruiti a partire da dati di posizione di una aliquota di veicoli della corrente; si dovrà, pertanto, verificare se il campione è statisticamente rappresentativo, ovvero se produce sul traffico gli stessi effetti indotti dal flusso totale di veicoli.

Purtroppo, non esiste una pratica consolidata per una valutazione sistematica delle prestazioni del sistema, per cui si ricorre a modelli di simulazione che consentono di confrontare i risultati ottenuti con le altre tecniche di misura (velocità, flussi, tempi di percorrenza) o di stimare l'errore quadratico medio delle stime ottenute, calcolato rispetto ai valori misurati delle grandezze.

2.9.1 UN ESEMPIO DI MIX OTTIMALE DI RILEVATORI FISSI/MOBILI

Un interessante studio sulla valutazione delle prestazioni, effettuato nell'ambito del progetto ATMO (Advanced Traffic Monitoring) dell'Università Tecnologica di Delft, cerca di rispondere ai seguenti quesiti:

- è possibile un graduale passaggio dalle tecniche di rilievo convenzionali (con strumentazione installata lungo l'infrastruttura) ad un sistema di monitoraggio basato sulla tecnologia FCD che sia in grado di garantire informazioni accurate ed affidabili?
- esiste un mix ottimale di utilizzo di rilevatori fissi e mobili?

Per rispondere a tali domande, è stato simulato il deflusso di una corrente di traffico su un tronco autostradale formato da N archi e che presenta una rampa di accesso; è stato considerato lo scenario in cui la domanda a monte e in corrispondenza della rampa cresce gradualmente fino ad attingere il valore di capacità, determinando inevitabilmente la congestione.

Le possibili configurazioni dei rilevatori di traffico ipotizzate nello studio derivano dalla combinazione delle seguenti opzioni di monitoraggio (Figura 34):

- un ciclo induttivo nella sezione 1 che misura la domanda a monte, 3 cicli induttivi nelle sezioni 1,4 e 7 e infine 7 cicli induttivi in corrispondenza di tutte le sezioni dalla 1 alla 7;
- adozione di un sistema tipo FCD con quote di penetrazione pari rispettivamente a 0, 2, 4, 6, 8 e 10%.

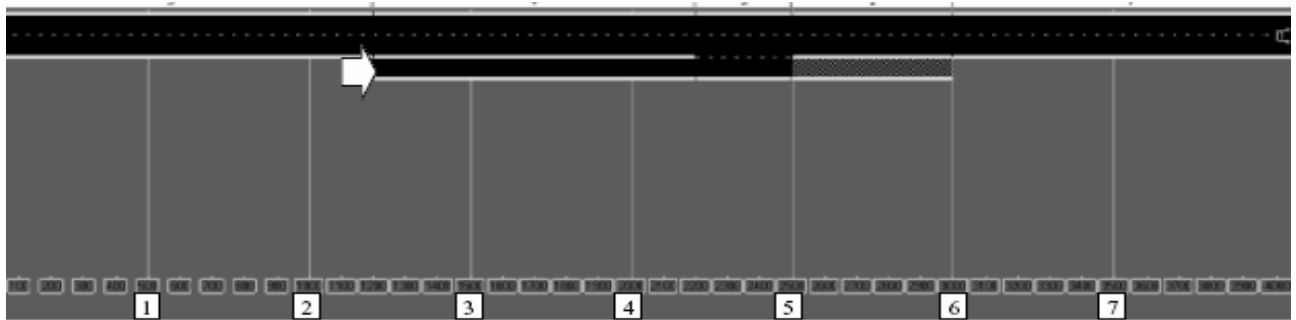


Figura 34 – Configurazione della strumentazione di rilievo considerata nel progetto ATMO dell'Università Tecnologica di Delft

Per realizzare un sistema robusto rispetto a malfunzionamenti della strumentazione, ogni scenario è testato con crescenti percentuali di dati persi (sia per i sensori fissi sia per i mobili), omettendo di volta in volta le rilevazioni disponibili in misura di 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.

Pertanto, si giunge ad un numero di $3 \times 6 \times 6 = 108$ simulazioni necessarie.

Il deflusso della corrente è studiato con il modello macroscopico del primo ordine di Lighthill e Witham, utilizzando una distribuzione triangolare per interpretare, nel piano velocità-densità, il condizionamento dei veicoli. Inoltre, lo studio ha tenuto conto anche delle possibili variazioni dei risultati in funzione della particolare configurazione del modello; nel seguito, si riporteranno delle considerazioni derivanti unicamente dall'applicazione del modello di LWR con calibrazione off-line dei parametri di velocità libera, velocità critica, densità critica e densità massima a partire da dati di flusso e di velocità ottenuti da un modello di microsimulazione del traffico.

Per la misura delle prestazioni ottenibili dai diversi scenari di monitoraggio, il beneficio è esprimibile come la radice quadrata dell'errore quadratico medio (RMSE) di tutte le velocità d'arco stimate durante un intervallo di simulazione T:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (\hat{u}_{i,t} - u_{i,t})^2}$$

L'accuratezza può essere derivata dalla media dei valori di RMSE su tutte le percentuali di dati persi, ovvero come:

$$PERF = \frac{1}{N_{FP}} \sum_{i=1}^{N_{FP}} RMSE(FP_i),$$

$FP_i = 0, 10, 20, 30, 40, 50$, $N_{FP} = 6$.

Come misura dell'affidabilità del sistema, si valuta il tasso con cui cresce il RMSE sotto percentuali crescenti di dati persi e ciò viene effettuato per ogni scenario di monitoraggio utilizzando la seguente regressione ai minimi quadrati:

$$RMSE_{FP_i} = B + UR * FP_i,$$

in cui UR è una misura di robustezza: più è piccolo più il sistema è robusto.

Sotto tali assunzioni, il sistema di monitoraggio può essere inaccurato e robusto, ovvero caratterizzato da un alto valore dell'indice PERF e un basso valore di UR e viceversa.

I risultati del modello di simulazione sono diagrammati in Figura 35.

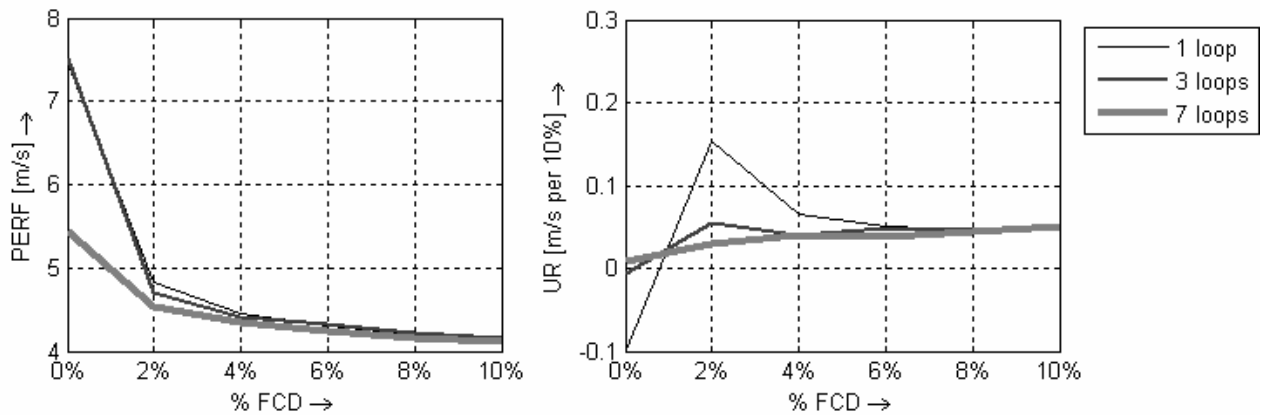


Figura 35 – Accuratezza e robustezza del modello sviluppato nell'ambito del progetto ATMO

I diagrammi mostrano un soddisfacente miglioramento delle prestazioni combinando opportunamente il numero di sensori fissi con il numero di veicoli sonda da introdurre nella corrente: già con un tasso di campionamento del 2% e con 3 sensori fissi si ottengono delle prestazioni migliori rispetto ad un sistema che presenta 7 rilevatori fissi e una percentuale nulla di FCD.

Si nota inoltre che le curve di prestazione sono convesse, per cui un aumento delle prestazioni del sistema (corrispondente alla diminuzione dell'indice PERF) è ottenibile incrementando il tasso di campionamento dei veicoli sonda; passando dallo 0% al 2% si ottiene un guadagno consistente (dell'ordine del 40%) mentre passando dal 6% all'8%, il guadagno è marginale.

In conclusione, i risultati dello studio mostrano che, almeno per il caso analizzato, si ottengono grandi vantaggi in termini di accuratezza e affidabilità del sistema di monitoraggio impiegando tassi di campionamento crescenti e un minor numero di sensori fissi.

3 Analisi dei modelli di traffico

La modellizzazione di strade urbane ed extraurbane ha attirato l'attenzione di molti studiosi del settore già a partire dalla seconda metà degli anni '50. Negli ultimi anni, poi, si è notato un notevole aumento dell'interesse e del lavoro di ricerca dedicato alla risoluzione dei problemi legati al traffico stradale ed autostradale, proprio a causa della sopracitata crescita del numero di veicoli circolanti ed ai sempre più frequenti problemi di sovraccarico della rete stradale.

Gli sforzi degli esperti del settore hanno condotto alla creazione di modelli matematici che potessero riprodurre fedelmente la realtà. In tal maniera è stato possibile ottenere strumenti informatici i quali permettono principalmente due tipi di analisi.

Una di queste è quella *simulativa* e consiste nell'osservare come il modello si comporta se sollecitato da particolari condizioni esterne, senza che queste debbano per forza verificarsi nella realtà. Infatti, potrebbe sicuramente interessare al gestore di una tratta stradale 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 analisi è di tipo *previsionale*, e consiste nel monitorare istante per istante le condizioni del traffico veicolare e da queste trarre importanti indicazioni sulla possibile evoluzione, nel breve futuro, del comportamento del sistema reale. Questo chiaramente permette di anticipare l'accadimento di fenomeni critici quali ingorghi o rallentamenti, eventualmente prevenirli, oppure, qualora non sia comunque possibile restare in una situazione di traffico scorrevole, 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.

Esiste una grande varietà di modelli del traffico: si fornirà una breve descrizione dei criteri di classificazione, successivamente alcuni di essi saranno illustrati con maggiore dettaglio.

3.1 Criteri di classificazione dei modelli

Possono essere individuati quattro fondamentali criteri su cui classificare i modelli del deflusso: l'interpretazione fisica, il livello di dettaglio, scala delle variabili indipendenti (discrete o continue), rappresentazione del processo (deterministico o stocastico).

Secondo la teoria dei sistemi, esistono tre principali approcci possibili alla modellazione:

- *White box* o approccio deduttivo, in cui si ricorre alle equazioni della fisica per descrivere le relazioni tra i differenti stati del sistema, espresse da proprietà che possono essere misurate;
- *Black box* o approccio induttivo, in cui sono registrati dati di input e di output (generalmente flussi di traffico, densità e velocità medie nel tempo) che vengono poi utilizzati per calibrare un generico modello parametrizzato; in questo caso nessuna legge fisico-matematica è introdotta per interpretare il passaggio da uno stato all'altro;
- Un approccio intermedio, *grey box*, considerato come combinazione di quelli precedenti; nella fase deduttiva, sono scritte delle equazioni parametriche tra gli stati di traffico, durante la fase induttiva le misure condotte su input/output vengono utilizzate per calibrare le relazioni input/output del modello di traffico. Importanti esempi che seguono tale approccio sono i modelli del primo ordine di Lighthill, Witham e Richards ed il modello di Payne del secondo ordine.

Con riferimento al livello di dettaglio, si individuano:

- *Modelli microscopici*, che descrivono il comportamento di ogni singolo veicolo della corrente, l'interazione tra veicoli e quella tra veicolo e infrastruttura. I modelli di simulazione microscopici prevedono la caratterizzazione della rete di trasporto (tramite numero di corsie, limiti di velocità, divieti di sorpasso) e dei veicoli (tramite origine e destinazione dello spostamento, velocità desiderata, tassi di accelerazione e decelerazione, tipo di veicolo, pazienza del guidatore, aggressività...). Durante la simulazione la rete oggetto di studio è caricata con un flusso di veicoli, che nel percorso che li conducono alle rispettive destinazioni, interagiscono gli uni con gli altri e con l'infrastruttura, secondo quanto previsto dal particolare modello microscopico utilizzato.
- *Modelli mesoscopici*, i quali non distinguono né tracciano singoli veicoli, ma specificano il comportamento di gruppi di veicoli in termini probabilistici; il traffico è rappresentato da piccoli gruppi di entità di traffico, le cui attività e interazioni sono descritte con un basso livello di dettaglio. Una manovra di cambio corsia è interpretabile come un evento istantaneo, il cui accadimento è condizionato dalle densità relative delle corsie e dai gradienti di velocità. Alcuni modelli, che

interpretano la dinamica delle distribuzioni di velocità, sono derivati dall'analogia con la teoria cinetica dei gas.

- *Modelli macroscopici*, che descrivono l'evoluzione di una corrente veicolare ad un alto livello di aggregazione, riassumendo così un'informazione su più veicoli; non sono in grado però di fornire informazioni su manovre individuali dei veicoli (cambio corsia). Tipicamente, un modello macroscopico definisce una relazione tra densità veicolare (numero di veicoli contenuti in una corsia di un determinato tronco stradale), velocità media e flusso di traffico (numero di veicoli che attraversano una sezione stradale nel tempo). All'interno di questa classe di modelli può essere fatta un'ulteriore distinzione sull'ordine dei modelli stessi; si ricordano il modello del primo ordine di Lighthill, Witham e Richards (1955), che utilizza come variabile per rappresentare lo stato del sistema unicamente la densità, quello di Payne (1971) del secondo ordine che ricorre invece alla densità e alla velocità media ed infine quello di Helbing (1996), un modello di traffico del terzo ordine che utilizza come variabili di stato densità, velocità media e varianza della velocità.

I modelli macroscopici, lavorando con variabili aggregate, si prestano molto bene a rapide simulazioni del traffico su reti di trasporto, poiché presentano minori oneri computazionali rispetto a quelli microscopici (minor numero di parametri da stimare). Inoltre può essere definita una funzione di costo, in termini di variabili aggregate, il che facilita il calcolo del costo associato a un determinato stato di traffico.

Un modello di traffico è detto *deterministico* se esiste una relazione deterministica tra gli input, gli stati e gli output del modello; se si simula il deflusso di una corrente due volte, sotto le stesse condizioni iniziali, con stessi input e stesse condizioni al contorno, si ottengono risultati perfettamente identici. Un esempio di modello deterministico è quello sviluppato da Payne.

Un modello è detto invece *stocastico* se contiene al suo interno almeno una variabile stocastica, con determinata funzione di distribuzione: in tale situazione eseguendo due simulazioni, sotto le stesse condizioni iniziali, con stessi input e stesse condizioni al contorno, si ottengono risultati differenti, dipendenti dal valore assunto dalla variabile stocastica in ogni simulazione. Dovranno essere condotte diverse simulazioni e mediare i risultati ottenuti in ognuna di esse, per considerare consistente la risposta del modello e trarre conclusioni indicative.

Un modello di traffico descrive l'evoluzione nel tempo delle variabili di stato su una rete più o meno estesa: ciò implica che esistono due variabili indipendenti, lo spazio e il tempo, che possono essere considerate sia *discrete* sia *continue*.

Dal momento che i modelli continui presentano generalmente soluzioni analitiche complesse, soprattutto in presenza di reti di trasporto estese, si procede ad una discretizzazione nello spazio e nel tempo, che tra l'altro consente anche una implementazione all'interno di codici di calcolo. Il modello di Payne, sin dalla sua origine, è stato concepito come un modello discretizzato nello spazio (sezioni di 500 m) e nel tempo (intervalli di 15 secondi).

Nel presente elaborato di laurea si porrà l'attenzione sui modelli macroscopici, poiché essi meglio si prestano alla progettazione di un sistema di controllo e regolazione del traffico rispetto ai modelli microscopici.

Prima di analizzare nel dettaglio i vari modelli del deflusso presenti in letteratura, si faranno alcune considerazioni sul fenomeno della congestione e sarà richiamato un importantissimo strumento dell'ingegneria del traffico, il *diagramma fondamentale*.

3.2 Regimi di circolazione

Per una serie di ragioni, risulta difficile avere rilievi di traffico che siano nel contempo dettagliati ed affidabili; innanzitutto non è possibile condurre degli esperimenti di laboratorio per ottenere misure delle grandezze in questione: i dati sono raccolti attraverso passive osservazioni piuttosto che sperimentazione attiva. Inoltre, in determinate circostanze, l'interpretazione dei dati acquisiti si presenta come un mero esercizio, data l'influenza degli stati di traffico da fattori esterni, come le condizioni climatiche.

Lo studio dei fenomeni connessi al deflusso di veicoli ha una storia abbastanza lunga; nonostante molti aspetti siano stati compresi con chiarezza, ancora oggi, molti altri sembrano rappresentare una sfida intellettuale.

Osservando un flusso continuo di traffico, è possibile distinguere differenti condizioni operative, dette *regimi di circolazione* o *fasi del deflusso*, ognuna delle quali caratterizzata da proprietà specifiche.

Per traffico poco intenso i veicoli viaggiano alla velocità desiderata: si assume che, nel caso un veicolo ne incontri uno più lento, possa cambiare facilmente corsia e sorpassarlo, senza apportare significativi ritardi al flusso. Tale regime di circolazione, detto **flusso libero**, permette ai veicoli di viaggiare alla massima velocità consentita, dipendente dall'infrastruttura, dalle caratteristiche meccaniche del veicolo e dai limiti di velocità. Di conseguenza tutti i veicoli viaggiano alla *velocità di flusso libero* (free flow speed), indicata col simbolo v_f .

Il regime di circolazione appena descritto si realizza solo per basse densità e implica un ampio distanziamento dei veicoli nella corrente; piccole perturbazioni spazio-temporali non hanno effetti rilevanti, per cui il traffico è stabile in condizioni di flusso libero.

Non appena la densità veicolare comincia a crescere, i veicoli viaggiano più vicini, il flusso aumenta finché non si raggiunge il valore massimo, ovvero la capacità della strada (q_c, q_{cap} o q_{max}), e si determina la **saturazione** dell'infrastruttura ed il distanziamento dei veicoli è minimo. Sotto tali condizioni, si osserva la formazione di plotoni di veicoli che viaggiano ad una corrispondente velocità (v_c o v_{cap}), di poco inferiore rispetto alla v_f . Alcuni di tali plotoni

sono molto instabili: è sufficiente che uno dei veicoli in coda rallenti per innescare un effetto a cascata che costringe i veicoli che seguono a brusche accelerazioni e, nel peggiore dei casi, possono verificarsi collisioni multiple tra veicoli. In queste condizioni il flusso diventa instabile, i conducenti sono più concentrati e allertati in questa fase e adattano, sotto elevate velocità, lo stile di guida a spazi e distanziamenti temporali più ridotti.

Aumentando ulteriormente la densità possono verificarsi rilevanti perturbazioni alla corrente che inducono un generico veicolo, con ridotto distanziamento, a frenare per evitare la collisione con il veicolo che lo precede; ciò determina una catena di reazioni che disgrega il flusso ed induce un vero e proprio collasso alla circolazione. Il corrispondente stato di **traffico** raggiunto è detto **congestionato** e il corrispondente valore di densità per cui avviene il collasso è detta *densità critica*, denotata col simbolo k_c o k_{cr} .

Incrementi ulteriori di densità provocano un eccessivo peggioramento del deflusso che sfocia nel noto fenomeno di *stop-and-go* osservabile in autostrada: i veicoli sono soggetti ad onde di stop-and-go che li costringono a rallentare in modo brusco o arrestarsi completamente, per poi ripartire. Si ha un blocco totale della circolazione, indicato col termine *jammed traffic*, in cui la densità presenta il suo massimo valore definito *jam density* (k_j , k_{jam} o k_{max}).

Si tratta di uno dei fenomeni più ampiamente studiati nell'ingegneria del traffico e può verificarsi per varie ragioni; la maggior parte di essi si determina in corrispondenza di punti singolari (bottlenecks) in cui vi è riduzione di corsie, ingressi in autostrada o dove la capacità è localmente ridotta.

Si osserva la formazione di una coda che si propaga a monte della corrente mentre a valle si registrano invece condizioni di flusso libero. La Figura 36 mostra il caso in cui il fenomeno si verifica su un tronco autostradale compreso tra una rampa di accesso e una di egresso: i dati di velocità (su intervalli di 5 min) mostrano che a valle (detector C) non si producono rallentamenti, cosa che invece succede a monte, in corrispondenza del detector A.

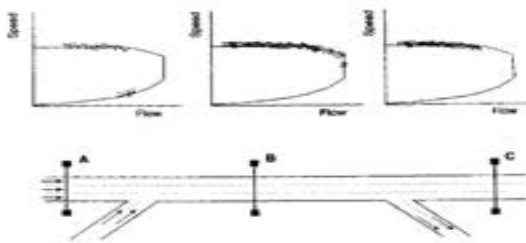


Figura 36 (sinistra) - Curve di deflusso sperimentali e localizzazione dei detector

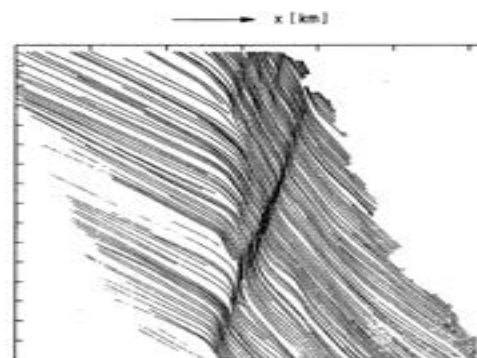


Figura 37 (destra) - Traiettorie dei veicoli dedotte da fotografie aeree

Nella sezione compresa tra le due rampe, le velocità sono alte rispetto a quelle rilevate nella posizione A, nonostante il numero di veicoli che attraversano il detector B sia massimo. In Figura 37 si osserva la formazione e la propagazione della perturbazione: inizialmente i veicoli sono sufficientemente distanziati gli uni dagli altri, dopodiché si nota una regione più densa in cui si è determinata la coda, che si propaga a monte (in direzione opposta al flusso di veicoli) e viene dissipata dopo un certo periodo di tempo.

Le precedenti considerazioni sono state dedotte da osservazioni sperimentali condotte da Treiterer (1975), che ha analizzato alcune fotografie aeree che ritraggono differenti condizioni di traffico su un'autostrada americana.

3.2.1 CORRELAZIONE TRA I REGIMI DI CIRCOLAZIONE

Come accade spesso in molte discipline scientifiche, teorie e affermazioni derivano dall'investigazione delle osservazioni del fenomeno oggetto di studio. Seguendo tale approccio, *Greenshields* fu il primo a sviluppare nel 1935 un modello empirico in cui prevedeva una relazione lineare decrescente tra velocità e densità:

$$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j} \right)$$

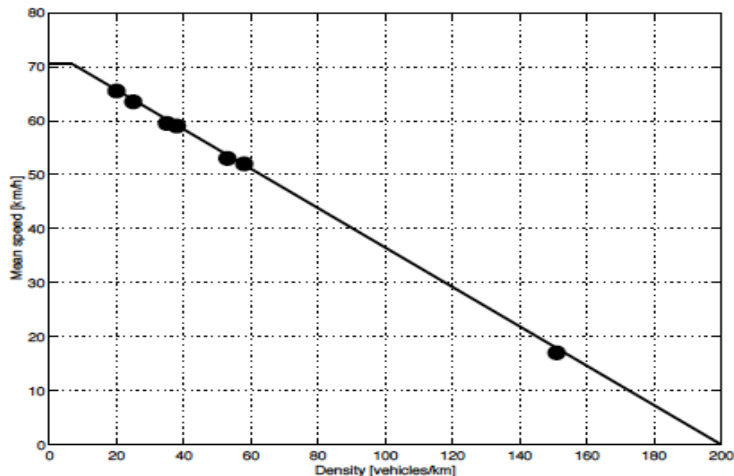


Figura 38 – Punti sperimentali e derivazione del modello di Greenshields velocità-densità

Dalla relazione precedente si nota che, all'aumentare della densità dal valore nullo fino a k_j , la velocità media decresce dalla velocità di flusso libero a zero; è possibile interpretare intuitivamente l'equazione assumendo che i conducenti tenderanno a rallentare in condizioni di traffico intenso per avere il tempo necessario per adattarsi ai cambiamenti (improvvisi frenate dei veicoli che precedono); nonostante non sia

contemplato nel modello, si ammette che per basse densità non ci sia condizionamento veicolare per cui il flusso viaggia alla massima velocità ammissibile.

Sebbene il modello di Greenshields appaia semplice ed elegante, la relazione si basa solamente su sette misure, dedotte da osservazioni aeree del 3 settembre 1934; il problema principale è che sei osservazioni sono state ottenute in condizioni di flusso libero e il punto rappresentativo del regime congestionato è stato rilevato in un'altra strada in un altro giorno.

Applicando l'equazione di stato al modello di Greenshields, si ottengono legami tra flusso e velocità e tra flusso e densità di tipo parabolico.

Questo modello ha senza dubbio il vantaggio della grande semplicità, ma non riproduce adeguatamente le modalità di deflusso veicolare. Infatti:

- l'andamento lineare implica che il condizionamento avvenga anche per densità molto basse, quando i veicoli sono più lontani della distanza di visibilità;
- l'andamento parabolico del flusso rispetto alla velocità impone che il flusso massimo sia ottenuto in corrispondenza del valore medio della velocità, vale a dire che sia

$$v_c = \frac{v_f}{2}$$

la stessa condizione vale per l'andamento, sempre parabolico, del flusso rispetto alla densità, per cui:

$$k_c = \frac{k_j}{2}$$

si ha quindi che la capacità deve valere:

$$q_{\max} = \frac{k_j v_f}{4}$$

il che, ottenuto in un campo di valori in cui mancano dati rilevati, è in contrasto con successive osservazioni sperimentali.

A partire dal modello di Greenshields sono stati sviluppati ulteriori modelli che esprimono il condizionamento dei veicoli su un'infrastruttura stradale, la cui descrizione esula dagli scopi del presente elaborato. Appare però interessante introdurre le ipotesi sul condizionamento veicolare che sono alla base della teoria dinamica del primo ordine, allo scopo di mettere in luce alcune carenze insite nel modello di Greenshields.

Lighthill e Witham, nel 1955, hanno presentato una teoria pionieristica (LWR) per descrivere la dinamica del deflusso di una corrente, sfruttando l'analogia con il moto di una corrente fluida in condizioni di traffico intenso. L'ipotesi principale alla base del modello è la seguente: *in una qualsiasi sezione stradale, il flusso q è una funzione della densità k* ; il modello LWR relaziona la velocità alla densità (seguendo lo stesso

approccio di Greenshields) e, tramite l'equazione di stato, determina la curva flusso densità (*flow-concentration curve*), che opera sotto condizioni di traffico stazionarie o all'equilibrio.

Pertanto, la teoria riproduce le caratteristiche medie della corrente; l'aspetto innovativo nell'approccio di Lighthill e Witham consiste nel fatto che essi hanno esteso la validità della curva flusso densità, in modo da includere anche condizioni di traffico non stazionarie. I due scienziati hanno altresì affermato che tale curva può variare da un giorno all'altro o nelle diverse ore della giornata a causa di cambiamenti nella composizione del traffico; ciò viene messo in luce quando si considerano curve relative a differenti classi veicolari.

Il termine *diagramma fondamentale* è storicamente basato sull'ipotesi del modello LWR circa l'esistenza di una "one-dimensional flow concentration curve"; nella sua forma originaria il diagramma fondamentale rappresenta una relazione di equilibrio tra flusso e densità ma, data la dipendenza delle grandezze in gioco per il tramite dell'equazione di stato, il termine diagramma fondamentale può essere indistintamente riferito alla curva $v(k)$ o alla $q(k)$.

3.2.2 FORMA E CARATTERISTICHE DEL DIAGRAMMA FONDAMENTALE

In questa sezione sono riassunte alcune caratteristiche qualitative dei possibili diagrammi fondamentali, ovvero delle possibili relazioni tra densità, velocità media e flusso di traffico.

- *Diagramma velocità-densità*
È il diagramma più semplice da comprendere intuitivamente; la forma funzionale della relazione di equilibrio tra flusso e densità può essere di vario tipo (lineare, logaritmica, esponenziale negativa), secondo l'approccio con cui è modellato il fenomeno della congestione. Nella Tabella 2 sono richiamate le relazioni introdotte da alcuni studiosi del traffico per tenere conto del condizionamento dei veicoli in una corrente.

Tabella 2.– Esempi di relazione velocità-densità

Modello	Forma funzionale
Greenberg (1959)	$v = v_f$ $0 \leq k \leq k_{cr}$ $v = v_f \log\left(\frac{k_f}{k}\right)$ $k_{cr} \leq k \leq k_f$

Smulders (1988)	$v = v_f \left(1 - \frac{ck}{k_j}\right)$ $0 \leq k \leq k_{cr}$	$v_f k_{cr} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k_j}\right)^{\beta}$ $k_{cr} \leq k \leq k_j$
Papageorgiou (1989)	$v = v_f \exp \left[-\frac{1}{a} \left(\frac{k}{k_{cr}} \right)^{\alpha} \right]$	

In sintesi, un diagramma v-k prevede una densità compresa tra il valore nullo e quello massimo k_j , da cui deriva una velocità compresa tra zero e la velocità di flusso libero; inoltre esiste un range di valori di basse densità per cui la velocità non subisce condizionamenti e coincide con v_f . Per valori di densità veicolari più elevati e via via crescenti il condizionamento è espresso come riduzione della velocità media della corrente.

- *Diagramma flusso-densità*
Rappresenta forse la forma più incontrata di diagramma fondamentale; un

esempio è riportato in

Figura 39.

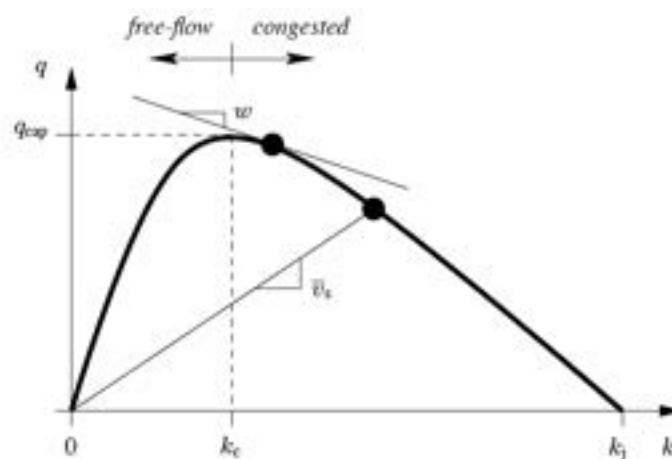


Figura 39 – Andamento tipico di un diagramma fondamentale flusso-densità

Come si può notare dal diagramma, per densità inferiori a quella critica il flusso cresce più o meno linearmente, mentre nelle vicinanze della densità critica comincia ad osservarsi una leggera curvatura, determinata dal fatto che i veicoli più veloci sono ostacolati da quelli più lenti; per tale ragione si determina una riduzione della velocità, rappresentata dalla pendenza del segmento che unisce l'origine con un generico stato di traffico (q,k). Il flusso massimo si raggiunge in

corrispondenza della densità critica, dopo la quale la curva assume un andamento decrescente fino a giungere alla densità massima in cui il flusso è nullo.

Un'ulteriore informazione deducibile dal diagramma è la seguente: la pendenza della tangente geometrica alla curva in un generico punto di essa è definita *velocità dell'onda cinematica*, che descrivono come si propagano gli stati di traffico nel diagramma fondamentale.

La forma illustrata del diagramma (q,k) è appena una possibilità, ne esistono ulteriori derivate dalla necessità di adattare le curve ai dati sperimentali; dopo il lavoro di Greenshields sono state proposte varie formulazioni basate su un singolo regime di circolazione, ovvero un'unica espressione tra le grandezze caratteristiche del deflusso per tutti i valori di densità. Sono stati proposti anche modelli multi-regime che presentano punti di discontinuità e che consentono un migliore adattamento ai dati.

Negli ultimi due decenni sono state proposte forme funzionali più sofisticate tra densità e flusso: esempi sono i lavori di Smulders (1988), un modello bi-regime che prevede in corrispondenza della densità critica un punto non differenziabile della curva (q,k) , il modello METANET di Messmer e Papageorgiou (1990) a regime singolo che introduce un punto di inflessione del diagramma fondamentale in corrispondenza della densità massima.

I diagrammi fondamentali, come qui sono intesi, possono essere concavi, convessi, discontinui, parzialmente lineari, differenziabili,...

Pur presentando un punto di discontinuità, una tipologia ampiamente utilizzata è quella triangolare, in base alla quale la corrente mantiene la velocità di flusso libero in tutti gli stati di traffico al di sotto di quello critico; per tale ragione le onde cinematiche risultano parallele alle traiettorie veicolari, per densità al di sotto di quella critica. Le onde d'urto, individuate dalla corda che unisce una generica coppia di stati di traffico, sul ramo sinistro hanno tutte la stessa velocità e similmente anche le caratteristiche individuabili sul ramo destro.

Variazioni di forma funzionale continueranno a essere proposte, poiché è certo che non esiste ancora un consenso tra gli ingegneri del traffico sulla corretta forma del diagramma fondamentale.

- *Diagramma velocità-flusso*

Il diagramma non esprime propriamente una funzione nel senso matematico del termine: dalla Figura 40 si nota che, per ogni valore del flusso, esistono due differenti velocità medie, una in flusso incondizionato (ramo superiore della curva) e una in regime congestionato (ramo inferiore della curva).

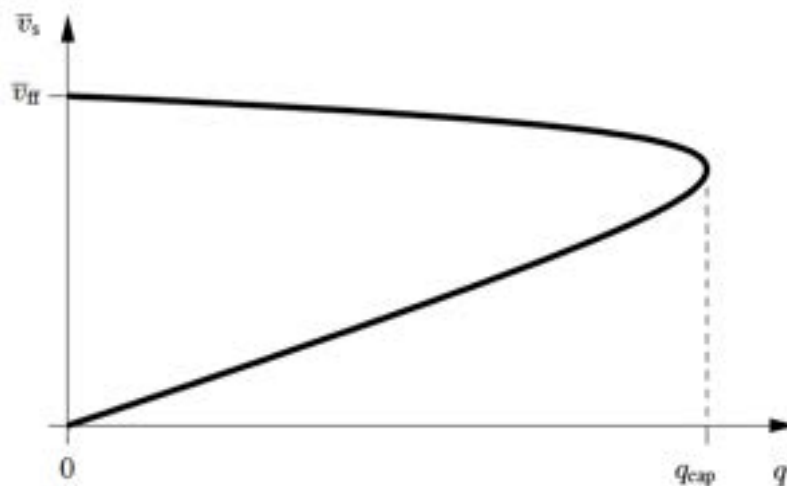


Figura 40 – Andamento tipico di un diagramma fondamentale velocità-flusso

A prima vista il diagramma è difficile da interpretare, per cui si preferisce far riferimento al diagramma fondamentale $v(k)$, poiché la densità rappresenta meglio la misura del grado di congestione.

I diagrammi presentati descrivono solamente delle possibili correlazioni tra le grandezze coinvolte nel deflusso, per cui resta ancora inesplorata la natura delle transizioni tra differenti regimi di traffico.

3.3 Calibrazione sperimentale

Come detto precedentemente, i diagrammi fondamentali rappresentano delle relazioni di equilibrio tra le grandezze macroscopiche del deflusso, mentre le misure ottenute dagli strumenti di rilievo non consentono di ottenere direttamente curve corrispondenti alle relazioni funzionali proposte nel tempo da vari autori.

A riprova di ciò, nella Figura 41 sono mostrati i plot dedotti da osservazioni sperimentali (flussi, occupazione, velocità medie temporali) condotte su una autostrada a 3 corsie di marcia, E17, nei pressi di Linkerover (Belgio).

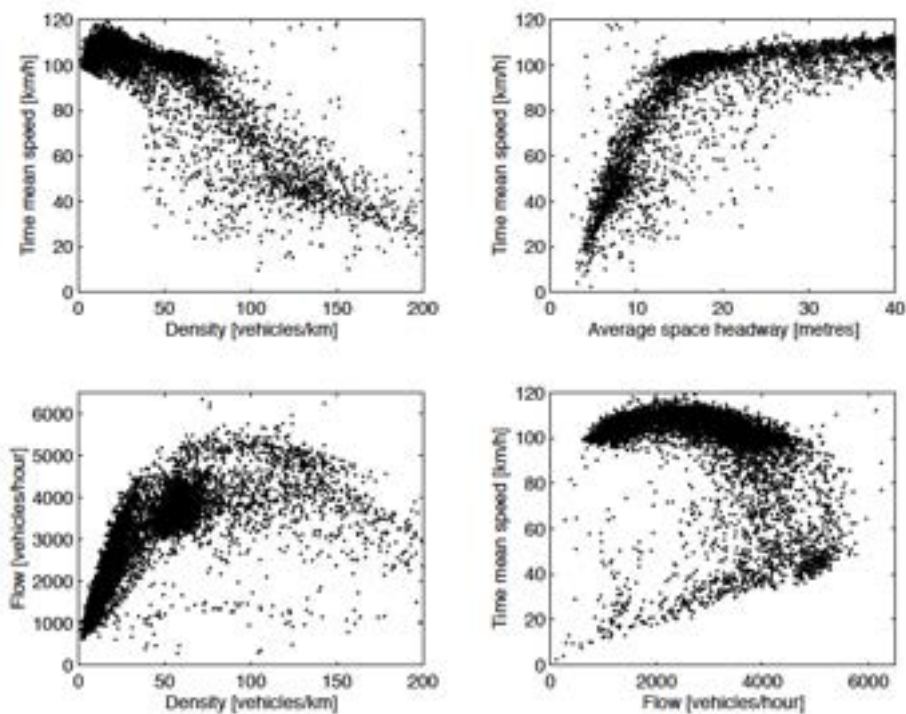


Figura 41 – Un esempio di plot delle relazioni tra le caratteristiche macroscopiche del deflusso

Nella realtà il traffico non è né omogeneo né stazionario; per tale ragione, invece di ottenere semplici curve si ottengono nuvole di punti più o meno estese. In condizioni di flusso libero le interazioni tra i veicoli sono piuttosto rare e piccole perturbazioni provocano effetti trascurabili, pertanto tutti i punti rappresentativi delle condizioni di flusso indisturbato sono concentrati su una linea in tutti e quattro i diagrammi.

Al contrario, in regime congestionato, i punti rappresentativi dei rilievi appaiono molto dispersi creando nuvole di punti, a causa delle interazioni tra veicoli. Inoltre le frequenti accelerazioni e decelerazioni provocano grandi fluttuazioni nel flusso, com'è dimostrato graficamente dalla presenza di una sottile ma ampia nuvola di dati.

I principali motivi che determinano la dispersione dei punti rappresentativi delle misure sono:

1. Eterogeneità della composizione del traffico in termini di velocità (veicoli veloci, mezzi pesanti lenti);
2. Comportamento non stazionario del traffico, determinante soprattutto in regime congestionato;
3. Dipendenza dal tipo di strada e dall'ora in cui sono effettuati i rilievi: non deve essere sottostimata l'importanza del fattore climatico.

In conclusione, per ottenere dati che meglio si adattano ai diagrammi fondamentali, le misure dovrebbero essere condotte sotto condizioni simili; inoltre assume una certa importanza il luogo in cui effettuare i rilievi, che dovrebbe anche tenere conto del fatto che onde cinematiche che si propagano verso monte (traffic jam), quando superano rampe di accesso, mostreranno effetti diversi dipendenti dalla posizione in cui le osservazioni sono acquisite (a monte, sulla rampa o a valle).

3.3.1 COMPORTAMENTO INSTABILE: FENOMENO DI ISTERESI

Agli inizi degli anni 60, gli ingegneri del traffico osservavano frequentemente una discontinuità delle misure in corrispondenza della capacità. Il diagramma fondamentale che ne derivava (Figura 42) assumeva la cosiddetta forma “lambda inversa”. Il flusso assume in corrispondenza della densità critica due valori differenti, dipendenti dalle condizioni di traffico (flusso libero o congestionato).

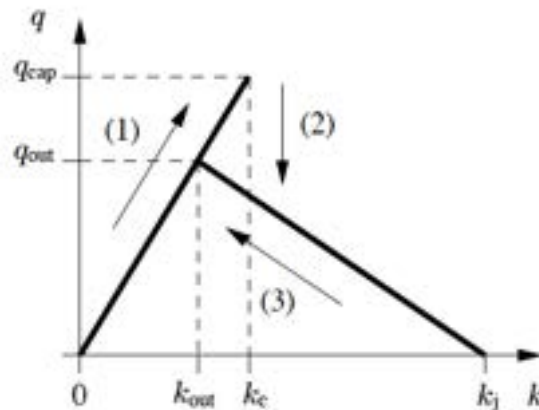


Figura 42– Tipica forma “lambda inversa” di un diagramma fondamentale

In condizioni non congestionate il flusso cresce all’aumentare della densità e piccole perturbazioni non producono effetti significativi; alla densità critica si osserva un *comportamento metastabile*: per piccoli disturbi il traffico è stabile, quando però questi diventano ampi si innesca un processo che induce effetti a cascata e ne provoca il collasso. Il regime di saturazione scompare a causa di un’improvvisa diminuzione del flusso, determinando un salto di discontinuità nella capacità.

Per recuperare le condizioni di flusso libero la densità deve essere ridotta al di sotto della densità critica, dove però la capacità assume un valore significativamente minore q_{out} , detto *scarico di capacità della coda*.

3.4 Modelli di deflusso del primo ordine

3.4.1 L’APPROCCIO CONTINUO

Tra le discipline della fisica, la meccanica del continuo studia il comportamento di solidi e liquidi e relative applicazioni nei campi dell’aerodinamica, idrodinamica,

idraulica; ciò che esse hanno in comune è l'ipotesi di continuità, in base alla quale il fluido è trattato come un mezzo continuo. Di conseguenza, le scale spaziali e temporali sono considerevolmente più ampie della dimensione caratteristica della molecola più grande e tutte le quantità possono essere trattate come variabili continue.

La decisione di adottare tale assunzione è basata sul *numero di Knudsen* del fluido: un valore basso (inferiore all'unità) corrisponde a un approccio fluidodinamico, mentre uno elevato indica un comportamento più granulare.

Storicamente, l'approccio fluidodinamico trova le sue radici nei lavori di Claude Louis Navier (1822) e George Gabriel Stokes (1845), che hanno condotto a quelle che oggi conosciamo come *equazioni di Navier-Stokes*, un set di equazioni non lineari alle derivate parziali che esprimono il comportamento di una corrente di fluido trattata secondo l'approccio continuo. La più rilevante di esse è la ben nota *legge di conservazione della materia* secondo cui il flusso netto è associato ad un incremento o diminuzione di materiale; si possono poi distinguere fluidi comprimibili o incompressibili (densità costante), viscosi o non. In particolare il comportamento dei fluidi a viscosità nulla (alto numero di Reynolds) è studiato attraverso le equazioni di Eulero, che sono un caso particolare delle equazioni di Navier-Stokes.

Una corrente di traffico è trattata al pari di una corrente di fluido viscoso e comprimibile: le densità, velocità medie e flusso sono variabili continue dello spazio e del tempo; per tale ragione si parla indistintamente di *modelli continui, fluidodinamici o macroscopici* del deflusso. Sfruttando l'analogia con una corrente di fluido, è possibile derivare modelli che presentano un limitato numero di equazioni, facilmente manipolabili; la dinamica delle variabili macroscopiche è descritta utilizzando equazioni differenziali.

La prima conseguenza dell'approccio continuo consiste nell'adozione della *legge di conservazione dei veicoli o equazione di continuità*, che è un'equazione differenziale del primo ordine che può essere derivata assumendo che il numero di veicoli presenti su un tronco stradale di lunghezza finita deve restare costante; formalmente:

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = 0$$

Il secondo membro della relazione precedente potrebbe prevedere dei termini che tengono conto di manovre di accesso ed uscita dalla strada, rispettivamente da rampe di ingresso ed egresso.

In virtù dell'analogia, è valida l'*equazione di stato* altrimenti detta *relazione fondamentale del traffico stradale*, che si presenta nella seguente forma:

$$q = kv$$

Dunque, allo stato stazionario le grandezze caratteristiche del deflusso non sono tra loro indipendenti ma legate dall'equazione di stato, che consente di esprimere una in funzione delle altre due.

L'equazione di stato è valida solo per variabili continue e per caratteristiche del traffico che soddisfano le seguenti condizioni:

- *traffico omogeneo*: composizione omogenea della corrente (tutti i veicoli della sono della stessa tipologia);
- *traffico stazionario*: le grandezze caratteristiche del deflusso non variano nello spazio e nel tempo, per cui tutte le traiettorie veicolari dovrebbero essere parallele ed equidistanti.

Quando si verifica l'ultima delle precedenti condizioni, si dice che il traffico è allo *stato stazionario* o all'*equilibrio*.

In presenza di condizioni non stazionarie l'equazione di stato continua a valere localmente e si presenta nella forma:

$$q(x,t) = k(x,t)v(x,t)$$

Nel seguito saranno presentate due tipologie fondamentali di modelli macroscopici: modello del primo ordine di Lighthill, Witham e Richards (LWR) e modello del secondo ordine di Payne .

3.5 Derivazione del modello di LWR

Lighthill e Witham furono tra i primi a sviluppare un modello macroscopico del traffico; un anno più tardi, nel 1956, Richards sviluppa indipendentemente lo stesso modello fluidodinamico anche se in una forma leggermente diversa, concentrandosi sulla derivazione delle onde d'urto dal punto di vista della densità (relative al passaggio da uno stato stazionario all'altro) mentre nel lavoro di Lighthill e Witham esse sono considerate come ostruzione al flusso.

Un'altra importante differenza consiste nel fatto che Richards introduce la relazione di equilibrio

$$V = a(b - D)$$

in cui V e D rappresentano rispettivamente la velocità media e la densità della corrente, mentre a e b sono due parametri del modello; Lighthill e Witham preferiscono invece non definire a priori una specifica forma funzionale per modellare il condizionamento veicolare.

In ogni caso tutti e tre gli autori convergono sulla seguente assunzione: assumendo l'approccio di continuità, il modello del deflusso può descrivere il comportamento dei veicoli in condizioni di traffico intenso; è per tale ragione che nell'articolo di Lighthill e Witham il titolo fa riferimento a "long crowded roads".

L'ipotesi fondamentale della teoria è che il flusso è considerato una funzione locale della densità, $q(k(x,t))$, sia in presenza di scarsa intensità di traffico sia in condizioni congestionate; di conseguenza l'equazione di conservazione può essere espressa come:

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q[k(x,t)]}{\partial x} = 0$$

ovvero

$$\frac{\partial k(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(k)}{\partial k} \frac{\partial k(x,t)}{\partial x} = 0$$

La risoluzione analitica dell'equazione precedente utilizzando il metodo delle caratteristiche comporta la determinazione di un'onda cinematica (kinematic wave) che viaggia ad una velocità costante (nel caso di piccole variazioni delle variabili di stato)

$$w = \frac{\partial q}{\partial k}$$

detta *velocità dell'onda cinematica*, che dal punto di vista geometrico rappresenta la pendenza della tangente al diagramma fondamentale flusso-densità.

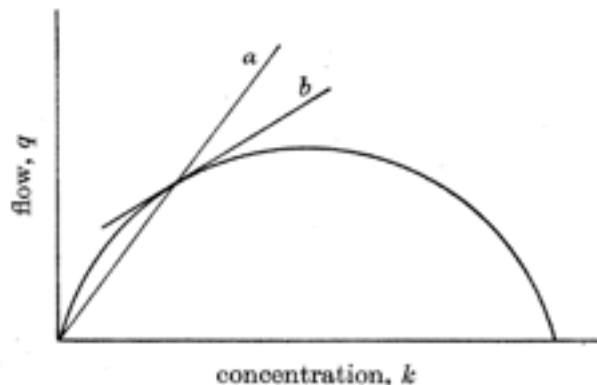


Figura 43 – Uso del diagramma fondamentale q - k : la pendenza del raggio vettore a fornisce la velocità media della corrente ($v=q/k$), la pendenza della tangente b rappresenta la velocità dell'onda ($w=dq/dk$)

Le soluzioni dell'equazione sono dette anche *caratteristiche*, poiché ottenute dalle funzioni caratteristiche dell'equazione differenziale e dunque ammettono un integrale generale della forma:

$$k(x,t) = k(x - wt)$$

con l'osservazione che lungo le caratteristiche la densità deve rimanere costante.

La soluzione dell'equazione precedente

$$u = x - wt$$

rappresenta quindi la propagazione di uno stato k nel piano (x,t) . Questa condizione può essere utilizzata per determinare lo stato di deflusso della corrente (ad esempio mediante la densità) in un qualsiasi punto lungo la retta u , a partire da un valore noto rilevato in un punto (x,t) appartenente alla stessa retta. Poiché la velocità di propagazione delle onde cinematiche lungo una corrente avente velocità v è data dalla tangente alla curva di deflusso nel punto v , si può osservare come:

- per $k > k_c$ è $w < 0$: stati di traffico densi si propagano all'indietro lungo la corrente;
- per $k < k_c$ è $w > 0$: stati di traffico fluidi si propagano in avanti lungo la corrente;
- per $k = k_c$ è $w = 0$, quindi lo stato di traffico critico non si propaga lungo la corrente.

Appare conveniente interpretare le velocità come pendenze geometriche poiché si possono dedurre importanti informazioni trasferibili sul diagramma spazio-tempo: un generico percorso su tale diagramma ha una pendenza dx/dt per cui un percorso veicolare medio è parallelo al raggio vettore dall'origine al punto caratteristico sul diagramma fondamentale; l'onda cinematica invece risulta parallela alla tangente alla curva.

La Figura 44 mostra lo schema di propagazione degli stati di traffico in una corrente in condizioni non stazionarie.

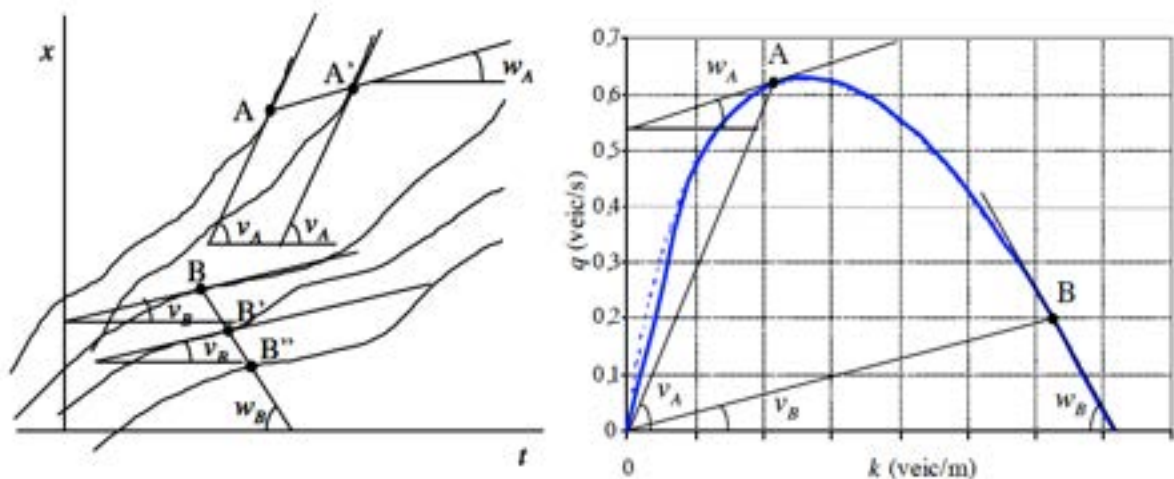


Figura 44 – Rappresentazione grafica della propagazione di uno stato di traffico secondo la teoria delle onde cinematiche

Il modello dinamico di Lighthill e Whitham è un modello completo: è cioè sufficiente a descrivere la dinamica del traffico veicolare senza la necessità di introdurre altre ipotesi

o equazioni, se non le necessarie condizioni al contorno. La soluzione è rappresentata da una famiglia di curve $u=u[k(x-wt)]$, curve caratteristiche o onde cinematiche, costituite dai punti del piano spazio-tempo aventi la stessa densità k .

Si osserva inoltre che il metodo delle caratteristiche può non ammettere soluzione unica: in tale caso la densità assume due valori differenti, ognuno appartenente a una specifica caratteristica. Ciò implica che in un dato punto dello spazio la velocità della corrente dovrebbe avere contemporaneamente due valori diversi, condizione che non è fisicamente accettabile.

Il modello LWR che, anche in questo caso prevede l'uso del diagramma fondamentale, fa riferimento a onde discontinue che si determinano in presenza di traffico più denso a valle e meno denso a monte: le onde per le quali il flusso è meno denso viaggiano più veloci di quelle su cui il flusso è più denso. In tale circostanza, un gruppo di onde continue è assorbito da un'unica onda discontinua, detta *onda d'urto* (shock wave), e la velocità dei veicoli è rapidamente ridotta.

Questo problema si osserva anche nella dinamica dei fluidi: quando una corrente più veloce raggiunge una corrente più densa si osserva la formazione di un'onda d'urto, che rappresenta un elemento di discontinuità del deflusso, in cui avviene il brusco passaggio da uno stato stazionario all'altro. L'onda d'urto si propaga lungo la corrente con una velocità che è possibile determinare risolvendo il problema dinamico nel caso di variazione discreta da uno stato all'altro; la soluzione è fornita da:

$$w_{shock} = \frac{\Delta q}{\Delta k}$$

ovvero la *velocità dell'onda d'urto* rappresenta la pendenza della corda che nel diagramma fondamentale unisce i due stati di deflusso, caratteristici delle condizioni a monte e a valle.

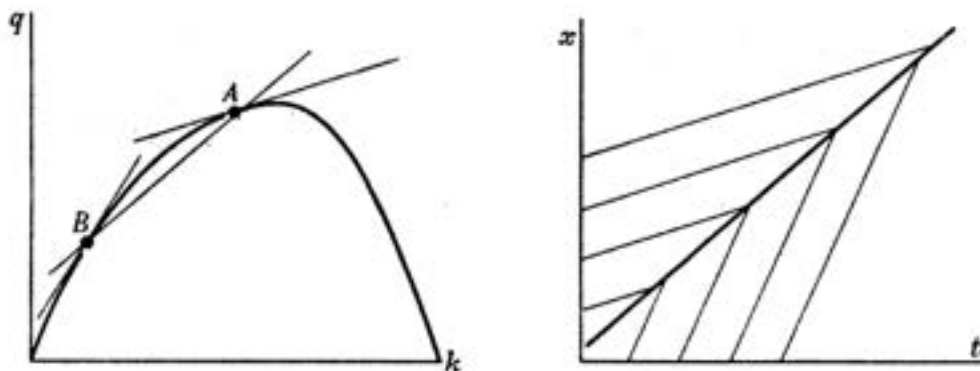


Figura 45 – Uso del diagramma fondamentale per prevedere le condizioni locali in prossimità di un'onda d'urto

In Figura 46 Figura 45 è illustrato il caso di una corrente di traffico in prossimità di una strozzatura che limita la velocità al di sotto del valore critico ed il flusso ad un valore inferiore a quello a monte della strozzatura. Gli stati di deflusso corrispondenti alle condizioni di traffico nella strozzatura ed a monte di essa sono indicati rispettivamente coi punti B e A.

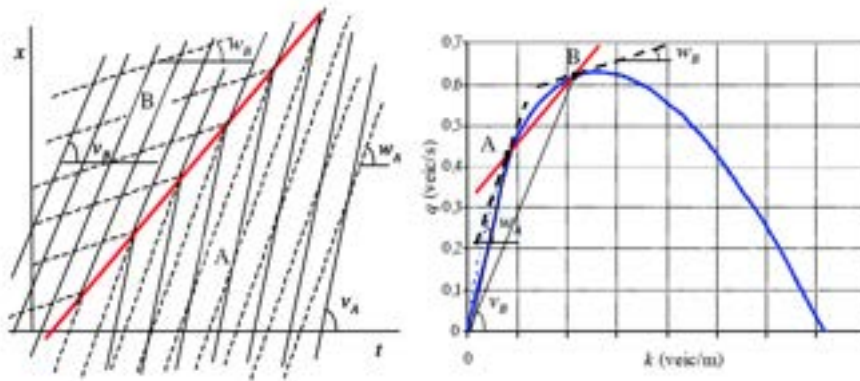


Figura 46– Metodo grafico di costruzione delle onde d’urto nel passaggio da una corrente più fluida a monte (A) ad una più densa a valle (B).

Dal diagramma fondamentale di Figura 46 è agevole osservare come, nel caso di una strozzatura, le onde tendano a richiudersi su se stesse nel passaggio da uno stato di traffico più fluido ad uno più denso.

Le onde d’urto rappresentano un’approssimazione discreta delle onde cinematiche: la corda che unisce i due stati di deflusso nel diagramma fondamentale sostituisce il passaggio graduale per le tangenti alla curva. Il passaggio da uno stato all’altro è approssimato mediante una discontinuità in cui la velocità cambia bruscamente di valore.

La risoluzione del problema dinamico del deflusso è agevole nel caso di una strozzatura che riduce puntualmente la velocità o di un veicolo lento che si immette nella corrente da un’entrata laterale. È invece molto laboriosa se si vuole rappresentare con maggiore dettaglio il periodo di transitorio in cui la corrente cambia con continuità velocità, poiché il modello prevede una serie di ipotesi approssimative che appaiono poco realistiche per uno studio delle variazioni dinamiche del traffico.

Per ragioni di completezza, si richiama un esempio classico di smaltimento di una coda di veicoli fermi a un semaforo, utilizzando il modello LWR ed adottando un diagramma fondamentale di tipo triangolare (Figura 47).

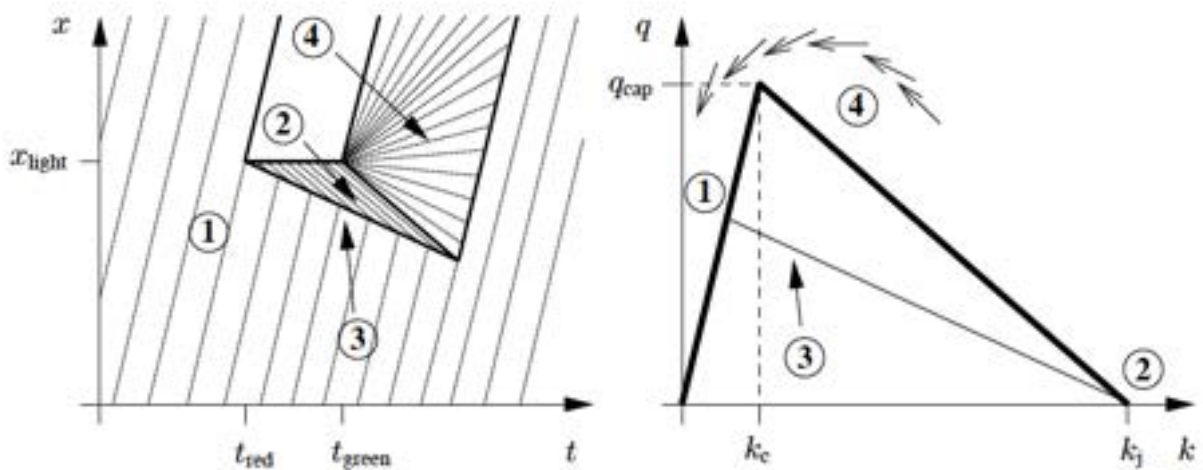


Figura 47– Smaltimento di una coda a un semaforo mediante il modello LWR

Il semaforo è collocato nella posizione x_{light} ed è inizialmente a via libera finché all'istante t_{red} diventa a via impedita, per tornare nuovamente a via libera. Lo stato iniziale di deflusso è indicato con 1 nel diagramma fondamentale: quando il segnale prescrive l'arresto, comincia a formarsi una coda di veicoli, che produce il blocco totale della circolazione che determina lo stato corrispondente al punto 2, in cui la densità raggiunge il suo valore massimo k_j . Essendo il diagramma fondamentale di tipo triangolare si nota che le traiettorie dei veicoli negli stati 1 e 2 coincidono proprio coi due rami della curva.

La condizione iniziale 1 e quella presente a valle della coda sono separate l'una dall'altra da un salto di discontinuità: a valle non ci sono veicoli, mentre a monte le condizioni di deflusso sono determinate dall'onda d'urto 3, che determina un rapido rallentamento dei veicoli che raggiungono l'intersezione. Quando il semaforo si dispone nuovamente a via libera, la coda comincia a dissiparsi per cui l'onda di rarefazione 4 si apre a ventaglio, permettendo alle velocità di raggiungere i valori compresi tra quelli caratteristici degli stati 1 e 2.

3.6 Rappresentazione discreta

La ricerca della soluzione dell'equazione differenziale può essere affrontata anche trattando il problema numericamente. Il dominio della corrente è discretizzato in celle consecutive di ampiezza l_i (non necessariamente uguale per tutte le celle) e viene utilizzato uno schema iterativo per aggiornare lo stato (la densità di ogni cella) in intervalli consecutivi $t\Delta t$, con $t \in \mathbb{N}_0$.

Tipicamente, ciò comporta l'adozione di uno schema alle differenze finite che sostituisce la rappresentazione del deflusso tramite l'approccio continuo e trasforma l'equazione di continuità in un'equazione alle differenze finite.

L'equazione seguente esprime il principio di conservazione in forma discreta tenendo conto dei flussi entranti e uscenti dalla cella i

$$k_i(t+1) = k_i(t) + \frac{\Delta t}{l_i n_i} [q_{i-1}(t) - q_i(t) + r_i(t) - s_i(t)]$$

dove n_i è il numero di corsie e $r_i(t)$ e $s_i(t)$ sono i flussi entranti e uscenti delle rampe di accesso ed egresso. Naturalmente per una completa rappresentazione del deflusso il modello deve essere integrato con il diagramma fondamentale $v^e(k)$ e con l'equazione di stato.

Tra le numerose applicazioni presenti in letteratura, una di esse è costituita dallo schema numerico sviluppato da Daganzo (1994), basato su equazioni alle differenze finite ed assumendo un diagramma fondamentale di tipo trapezoidale. Il modello, noto come *cell transmission model* (CTM), prevede una discretizzazione di celle, ognuna delle quali contiene un certo numero di veicoli; allo scorrere del tempo i veicoli sono “trasmessi” da monte a valle, tenendo in conto i vincoli di capacità imposti da alcune celle. Il modello CTM converge verso il modello LWR quando l'estensione delle celle tende a zero.

3.7 Proprietà e limiti del modello

Il modello dinamico del primo ordine raggiunge un soddisfacente grado di accuratezza, apportando certamente un miglioramento rispetto all'approccio puramente statico.

Suo punto di forza è indubbiamente la capacità di fornire soluzioni analitiche e interpretazioni grafiche, il che consente di evitare in certi casi il ricorso a risoluzioni numeriche. Inoltre i parametri di input si limitano a quelli previsti nella calibrazione del diagramma fondamentale; un rapido ed adeguato schema numerico consente approssimazioni per risolvere alcuni problemi pratici.

Le proprietà del modello LWR derivano dalle assunzioni che sono alla sua base: si utilizza un diagramma fondamentale in cui il traffico è omogeneo, stazionario e deterministico. Una diretta conseguenza di ciò sono le onde d'urto: il traffico cambia discontinuamente tra due stati stazionari e comporta accelerazioni infinite, cosa ovviamente irrealistica, per cui una più accurata descrizione delle zone di transizione richiederebbe la modellazione delle accelerazioni in condizioni di traffico non stazionario.

Tale situazione è causata dalla semplificazione cruciale alla base della teoria, che ammette che la velocità media $v(x,t)$ nel punto x e al tempo t si adatti istantaneamente alle variazioni di densità $k(x,t)$; si deduce che, sotto certe condizioni, si presentino irrealisticamente alte accelerazioni ed anche infinite decelerazioni in presenza di onde d'urto.

Un'altra mancanza è nella rappresentazione dell'evoluzione di un plotone di veicoli: si prevede che la densità in coda al plotone sia elevata e che i veicoli, in virtù dell'alta velocità, riescano a raggiungere il corpo principale del plotone, invece che disperdersi. Certamente questo difetto qualitativo non appare sufficiente per rigettare il modello, ma limita la sua applicazione soprattutto nella progettazione delle strategie di controllo e dei relativi test di simulazione.

Inoltre l'assunzione dell'approccio continuo e stazionario non consente di riprodurre fenomeni di instabilità della corrente di traffico, spesso osservati in autostrada in corrispondenza di bruschi incrementi di densità (stop-and-go), né la cosiddetta isteresi del traffico, fenomeno osservato nello smaltimento di una coda in autostrada.

Infine, l'omogeneità del traffico derivante dall'analogia con una corrente di fluido, pregiudica la possibilità di rappresentare la variabilità di comportamento di guida da un conducente all'altro, di caratteristiche dei veicoli e di manovre individuali (sorpasso o cambio corsia).

3.8 Estensioni del modello

Nel corso degli anni il modello LWR è stato esteso e raffinato: diversi perfezionamenti sono stati proposti per tenere conto del carattere eterogeneo e non stazionario della corrente di traffico nelle condizioni reali. Ogni estensione prevede alcune ipotesi e nuovi parametri introdotti incrementano l'input del modello.

In riferimento al carattere eterogeneo della corrente, un interessante contributo è stato fornito da Daganzo (1997), che introduce due classi veicolari, una che utilizza tutte le corsie di un'infrastruttura stradale e l'altra vincolata al gruppo destro di corsie. Quando per quest'ultima classe è raggiunta la capacità della strada, viene a crearsi una coda ma i veicoli davanti sono in grado di utilizzare le altre corsie. Quello appena descritto è definito, adottando il termine inglese, *2-pipe regime*.

Analogamente, se invece è superata la capacità della corrente in flusso libero, tutte le corsie entrano in uno stato di coda, noto come *1-pipe regime*.

Il modello, che è stato applicato a un caso in cui esiste un set di corsie speciali che possono essere utilizzate solo da veicoli con priorità, è anche adatto a descrivere la congestione in corrispondenza di punti di divergenza di un'autostrada.

Daganzo (2002) ha successivamente fornito un'estensione logica del modello, che oltre a prevedere differenti corsie, considera anche due categorie di guidatori: aggressivi (rabbits) e timidi (slugs); il motivo risiede nel fatto che una corretta teoria del deflusso dovrebbe coinvolgere insieme fenomeni di cambio corsia e aspetti psicologici.

La teoria è utilizzata per spiegare anche la riduzione di capacità in prossimità di una strozzatura: il recupero di capacità non può avvenire spontaneamente, ma richiede un meccanismo esogeno, chiamato fenomeno di *pumping*, secondo cui i conducenti dei veicoli accettano temporaneamente, a valle di una rampa di ingresso, ridotti distanziamenti temporali, che determinano uno stato di traffico "gonfio" caratterizzato da alta densità ed alta velocità.

Un ulteriore interessante contributo nella modellazione di correnti di traffico eterogenee è stato fornito da Gazis e Herman (1992), i quali hanno affrontato il problema delle *strozzature mobili* (moving bottlenecks). Un tipico esempio è rappresentato dalla presenza di mezzi pesanti sulle corsie di destra, che può ostacolare il flusso a monte.

Newell (1998) è stato tra i primi a fornire una consistente e soddisfacente trattazione del problema, trasformandolo in un sistema coordinato mobile che viaggia alla velocità consentita nella strozzatura; ciò ha condotto a diversi inconvenienti tra cui quello più serio si riscontra nella non validità della teoria per traffico poco intenso e nella previsione di strani effetti, quali la diminuzione della capacità a monte della strozzatura all'aumentare della velocità del bottleneck mobile.

Successivamente, Muñoz e Daganzo (2002) hanno applicato la teoria comportamentale precedentemente descritta al problema dei bottleneck mobili, riscontrando soddisfacenti risultati confermati anche dalle caratteristiche osservate in autostrada. Trattandosi però di un modello tipo LWR, non consente di riprodurre alte velocità in presenza di scarsa intensità di traffico: in questo caso i due autori hanno constatato che le differenze nel comportamento tra conducenti si sono dimostrate più importanti della dinamica dettata dal modello cinematico.

Un approccio alternativo per affrontare l'eterogeneità del traffico è stato fornito da Munjal e Pipes (1971), Munjal *et al* (1971), Holland e Woods (1997) e Greenberg *et al* (2003), che hanno suddiviso l'infrastruttura in corsie di traffico, caratterizzata ciascuna da proprietà di omogeneità; ciò ha condotto all'elaborazione di modelli che prevedono l'adozione di un diagramma fondamentale per ogni corsia di traffico e che consentono di rappresentare manovre di cambio corsia sulla base dei gradienti di densità tra le varie corsie.

Per quanto riguarda il carattere non stazionario delle correnti reali, nel paragrafo successivo, saranno introdotti i modelli di ordine superiore al primo. Per il momento, si fa notare che essi introducono delle relazioni aggiuntive per cui resta inalterata la struttura delle equazioni di continuità, di stato e il diagramma fondamentale.

4 Il modello di deflusso del second'ordine

4.1 Derivazione del modello

L'analisi dello stato dell'arte dei modelli di deflusso macroscopici ha evidenziato come il limite principale del modello di LWR sia l'incapacità di rappresentazione delle reali condizioni di traffico (stop-and-go, sorpasso, cambio corsia).

I modelli del secondo ordine sono nati dalla necessità di colmare le carenze dei modelli del primo ordine, aggiungendo delle relazioni che tengono conto dell'impossibilità dei conducenti di adeguare istantaneamente la velocità alle variazioni di densità ed assumono per la corrente di traffico un comportamento analogo a quello di un veicolo (follower) che adegua il proprio comportamento, in termini di variazioni di velocità, in dipendenza degli stimoli che esso riceve dal veicolo che lo precede (leader):

$$v(x(t+\tau), t+\tau) = v^e(k(x+\Delta x, t)), \quad (3.1)$$

in cui τ denota il *tempo di reazione*, $x(t)$ la posizione del veicolo all'istante t , $v(x, t)$ la sua velocità alla posizione x e all'istante t , Δx il distanziamento dal veicolo precedente e v^e la velocità d'equilibrio espressa in funzione della densità k a $(x+\Delta x, t)$. Si deduce che i veicoli non adattano più istantaneamente la velocità quando incontrano un'onda d'urto, ma secondo un differimento spaziale e temporale.

Espandendo in serie di Taylor rispettivamente il primo e il secondo membro dell'equazione (3.1), seguendo Payne (1979), si ottiene:

$$v(x(t+\tau), t+\tau) = v(x, t) + \tau \cdot v(x, t) \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} + \tau \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}$$

$$v^e(k(x+\Delta x, t)) = v^e(k(x, t)) + \Delta x \frac{\partial k(x, t)}{\partial x} \frac{dv^e(k(x, t))}{dk}$$

che fornisce:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{(v^e(k) - v)}{\tau} - \frac{c_0^2}{k} \frac{\partial k}{\partial x} \quad (3.2)$$

dove $c_0^2 = \xi/\tau$, è la costante di anticipazione in cui $\xi = -dv^e/dk$ è il tasso di decrescita della velocità di equilibrio all'aumentare della densità; assumendo un tasso costante si ricava un relazione lineare tra la densità e la velocità $v^e(k)$.

Per la funzione $c_0(k)$, che identifica la velocità di propagazione delle onde d'urto, si adotta la seguente espressione:

$$k \frac{dv^e(k)}{dk}$$

dove v_w è un parametro del modello.

Nell'equazione 1.2.2, detta *equazione dinamica della velocità*, il primo membro rappresenta la derivata totale della velocità, mentre il secondo membro cattura tre differenti aspetti della dinamica del deflusso: un *termine convettivo* (C) descrive come varia velocità in funzione di arrivi e partenze di veicoli in (x,t) , un *termine di rilassamento* (R) come i veicoli adeguano la propria velocità rispetto a quella di equilibrio in un certo tempo di reazione (nel modello LWR l'adeguamento è istantaneo) e un *termine di anticipazione* (A) come i veicoli reagiscono alle condizioni di traffico a valle.

4.2 Formulazione discreta

Per semplificare la ricerca della soluzione del modello conviene riferirsi ad una forma discreta (nello spazio e nel tempo): un tronco stradale è suddiviso in un numero N di segmenti di lunghezza l_i , mentre la discretizzazione temporale $t\Delta t$, con $t=0,1,2,\dots$ è basata su un time step o intervallo di simulazione Δt .

$$v_i(t+1) = v_i(t) + \underbrace{\frac{\Delta t}{l_i} v_i(t) [v_{i-1}(t) - v_i(t)]}_C + \underbrace{\frac{\Delta t}{\tau} [v^e(k_i(t)) - v_i(t)]}_R - \underbrace{\frac{v_a \Delta t [k_{i+1}(t) - k_i(t)]}{\tau l_i [k_i(t) + \kappa]}}_A \quad (3.3)$$

in cui v_a indica la costante di anticipazione, $v^e(k_i(t))$ la velocità di equilibrio deducibile dal diagramma fondamentale e κ un parametro del modello. Come si nota dall'equazione precedente, la velocità nella sezione i al tempo $(t+1)$ uguaglia la velocità nella sezione stessa al tempo t più una correzione dovuta rispettivamente a:

- *convezione* (C): i veicoli che viaggiano tra $i-1$ e i non adeguano istantaneamente la velocità ed in particolare quelli che attraversano la sezione $i-1$ a velocità elevata rallentano gradualmente fino ad assumere una velocità che essi giudicano confortevole per la sezione successiva; durante la frenatura la velocità risulta superiore a quella di equilibrio. Al contrario, i veicoli che invece viaggiano a velocità basse in $i-1$ richiedono un tempo per accelerare fino alla velocità desiderata.
La convezione è inoltre proporzionale alla differenza di velocità tra le due sezioni e dunque più alta sarà tale differenza maggiore sarà il tempo per accelerare o frenare e maggiore sarà l'impatto sulla velocità media nella sezione; inoltre C è proporzionale anche alla velocità nella sezione, infatti, s'impiegherà più tempo maggiore per ottenere la variazione di energia cinetica se la velocità in $i-1$ è elevata; infine l'impatto della convezione si fa sentire anche su sezioni più lunghe dato che maggiore sarà in tal caso la distanza cui i veicoli viaggiano alla velocità desiderata;
- *rilassamento* (R): si deduce che quanto più si è lontani dalla velocità desiderata maggiore sarà la durata dell'azione intrapresa dai conducenti e maggiore risulterà il rilassamento. Il tempo di reazione interpreta la rapidità di risposta dei conducenti e quindi quanto più grande è τ tanto più lenta è la risposta e più piccolo il rilassamento.
- *Anticipazione* (A): tiene conto del fatto che i veicoli sono influenzati dalle condizioni a valle, pertanto un incremento di densità induce i veicoli a rallentare mentre una diminuzione li porta ad accelerare. Si fa notare inoltre come la

costante di anticipazione dipenda dalla differenza relativa di densità tra le sezioni i e $i+1$.

4.3 Correzione empirica

In letteratura è stata proposta un'estensione dell'equazione 3.3 per tenere conto di alcuni fenomeni tipici riscontrati nel moto di una corrente.

In condizioni di traffico intenso, si osserva un rallentamento del flusso in corrispondenza delle rampe di accesso (Figura 48), che potrebbe essere fatto risalire a un incremento di densità a valle di una rampa di ingresso e su di essa. Nella realtà, si dovrebbe tenere conto del fatto che i veicoli che accedono all'infrastruttura, attraverso manovre di cambio corsia, inducono dei disturbi al flusso principale che si traducono in una diminuzione della velocità media.

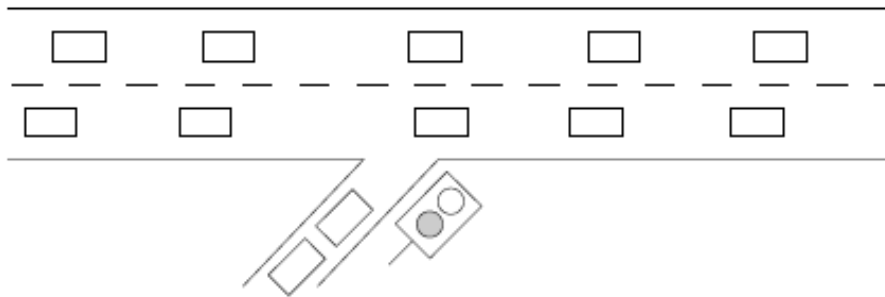


Figura 48 – Influenza dei flussi di rampa

Si tiene conto delle perturbazioni appena descritte aggiungendo il termine

$$-\left(\frac{\delta \Delta t}{l_i n_i}\right) \frac{r_i(t) v_i(t)}{k_i(t) + \kappa} \quad (3.4)$$

dove δ è un parametro del modello.

L'impatto sul flusso principale che hanno i veicoli, che dalla rampa s'immettono in autostrada, diventa maggiore al crescere della velocità: per velocità elevate (bassa densità) i disturbi provocati dalle manovre di ingresso (cambio corsia) sono maggiori che per velocità basse (elevata densità), in cui la diminuzione di velocità è minore.

Inoltre, il fenomeno è inversamente proporzionale alla densità di traffico della corrente principale.

L'equazione 3.3 si trasforma allora in:

$$v_i(t+1) = v_i(t) + \underbrace{\frac{\Delta t}{l_i} v_i(t) [v_{i-1}(t) - v_i(t)]}_c + \underbrace{\frac{\Delta t}{\tau} [v^*(k_i(t)) - v_i(t)]}_h - \underbrace{\frac{v_a \Delta t [k_{i+1}(t) - k_i(t)]}{\tau l_i [k_i(t) + \kappa]}}_A - \left(\frac{\delta \Delta t}{l_i n_i}\right) \frac{r_i(t) v_i(t)}{k_i(t) + \kappa} \quad (3.5)$$

Il cambiamento di corsia dovuto alla scomparsa di una corsia può essere spiegato come un fenomeno simile all'immissione di traffico dalla rampa di ingresso nella corrente principale ed anche in questo caso determina una riduzione della velocità media. Il flusso r_i è allora approssimato come

$$\frac{\Delta n_i}{n_i} k_i(t) v_i n_i$$

con $\Delta n_i = n_i - n_{i+1}$.

Sostituendo nell'equazione 3.4 e, osservando che la riduzione di velocità dovuta alla scomparsa di una corsia è più pronunciata per traffico denso o congestionato, il termine addizionale è rappresentato da:

$$-\left(\frac{\phi \Delta t}{l_i n_i}\right) \left(\frac{\Delta n_i k_i(t)}{k_{cr,i}}\right) v_i^2(t)$$

che viene preso in considerazione nell'equazione 3.5 ogni volta che $n_{i+1} < n_i$.

La struttura complessiva del modello, opportunamente discretizzato nello spazio ($i=1, \dots, N$) e nel tempo ($t \Delta t$ con $t=0, 1, 2, \dots$), per un tronco autostradale che presenta rampe di accesso ed egresso, è fornita dal seguente set di equazioni:

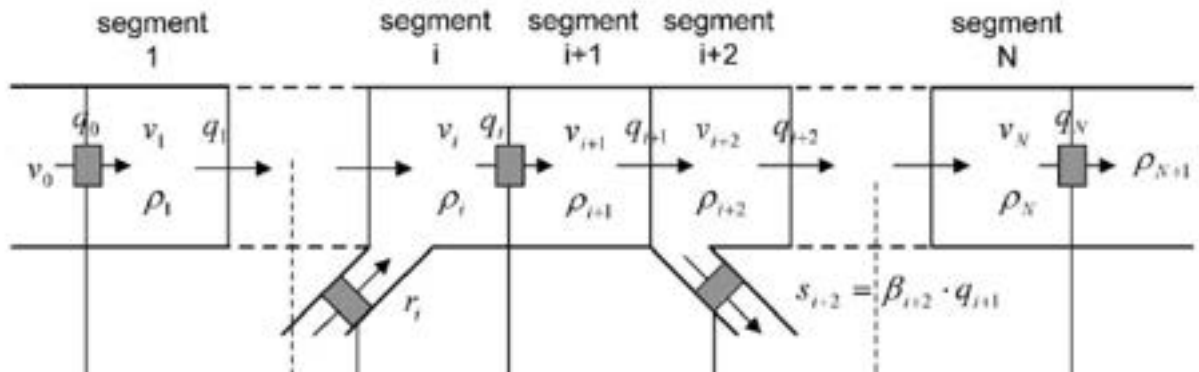


Figura 49 – Modellizzazione di un tronco autostradale

$$k_i(t+1) = k_i(t) + \frac{\Delta t}{l_i n_i} [q_{i-1}(t) - q_i(t) + r_i(t) - s_i(t)] \quad (3.6)$$

$$s_i(t) = \beta_i(t) q_{i-1}(t) \quad (3.7)$$

$$v_i(t+1) = v_i(t) + \underbrace{\frac{\Delta t}{l_i} v_i(t) [v_{i-1}(t) - v_i(t)]}_c + \underbrace{\frac{\Delta t}{\tau} [v^*(k_i(t)) - v_i(t)]}_k - \underbrace{\frac{v_a \Delta t [k_{i+1}(t) - k_i(t)]}{\tau l_i [k_i(t) + \kappa]}}_A - \left(\frac{\delta \Delta t}{l_i n_i}\right) r_i(t) v_i(t) \quad (3.8)$$

$$v^*(k) = v_f \exp \left[-\frac{1}{a} \left(\frac{k}{k_{cr}} \right)^a \right] \quad (3.9)$$

$$q_i(t) = k_i(t)v_i(t) \quad (3.10)$$

in cui le equazioni (3.6), (3.8), (3.9), (3.10) rappresentano rispettivamente l'equazione di conservazione, l'equazione dinamica della velocità, il diagramma fondamentale e l'equazione di stato; l'equazione (3.7) costituisce invece una modellazione delle uscite che avvengono ad un tasso β .

I parametri τ , v_a , δ , κ , v_f , k_{cr} e a si assumono identici per tutti i segmenti e sono generalmente sconosciuti, possono inoltre variare anche in funzione delle condizioni ambientali; i risultati del modello sono sensibili a variazioni di velocità libera, densità critica e esponente a , per cui si assume che solo i restanti parametri siano determinati da calibrazioni off-line.

È facile verificare come la capacità sia pari a:

$$q_{cap}(v_f, \rho_{cr}, a) = v_f \rho_{cr} \exp \left(-\frac{1}{a} \right)$$

Per ogni segmento, il flusso $q_i(t)$ può essere calcolato dall'equazione (3.9) e sostituito nell'equazione (3.5), dunque $k_i(t)$ e $v_i(t)$ possono essere considerate variabili di stato. Inoltre, per ogni istante sono necessarie le variabili $q_{i-1}(t)$, $v_{i-1}(t)$, $k_{i+1}(t)$, così come $r_i(t)$ e $\beta_i(t)$, per aggiornare le variabili di stato ai valori che esse assumono nell'istante successivo. È pertanto confermato l'impatto dei segmenti adiacenti sulla dinamica del traffico nel tratto i .

Si osserva infine che, sostituendo le equazioni (3.6) e (3.9) nella (3.5) e l'equazione (3.8) nella (3.7), si ottiene un modello costituito da $2N$ equazioni, $2N$ variabili di stato e 3 parametri. Devono essere poi individuate le condizioni al contorno che coinvolgono le seguenti variabili:

- a) flusso all'origine del tronco q_0 ;
- b) velocità all'origine del tronco v_0 ;
- c) densità alla destinazione k_{n+1} ;
- d) flussi sulle rampe di ingresso r_i ;
- e) tasso di uscita dalle rampe di egresso β .

4.4 Modalità di applicazione del modello

4.4.1 LIVELLI DI AGGREGAZIONE DELLE VARIABILI

Il modello presentato nella sezione precedente è utilizzato per descrivere il comportamento del traffico in condizioni dinamiche in forma aggregata prescindendo dal singolo veicolo e rappresentando lo stato del sistema mediante l'andamento delle variabili macroscopiche del deflusso. Il modello prevede la conoscenza della domanda

in ingresso al tronco in analisi, delle condizioni iniziali del sistema e delle condizioni di ingresso, rappresentate dai flussi in ingresso e uscita dalle rampe. L'arteria di studio è suddivisa in un certo numero di sezioni stradali e la determinazione delle grandezze caratteristiche avviene ad ogni intervallo di avanzamento della simulazione. Per raggiungere questo proposito, occorre passare dallo studio del fenomeno in sé allo studio di una sua modellizzazione che permetta di simulare il fenomeno del deflusso su N archi stradali al variare degli intervalli temporali. Pertanto, si rendono necessarie le seguenti operazioni:

- Trasformare in informazioni matematiche tutti i dati relativi all'autostrada, quali condizione del traffico (scorrevole, congestionato, rallentato, ecc.), le caratteristiche della carreggiata (velocità massima delle corsie, capienza massima di veicoli, ecc.).
- Scegliere un insieme di grandezze che, ad ogni istante di tempo t , descrivano in maniera esauriente lo stato in cui si trova il sistema. Esse prendono il nome di *variabili di stato* o *output* del sistema:
 - ρ_i è la densità veicolare e definisce quanti veicoli stanno impegnando la carreggiata autostradale al tempo t ed sull'arco i ;
 - q_i è il flusso veicolare e definisce quanti veicoli attraversano la sezione i , in un determinato intervallo di tempo t ;
 - v_i è la velocità media e definisce la velocità media che i veicoli mantengono al tempo t ed in i .
- Scegliere un insieme di grandezze dinamiche che ad ogni istante di tempo t descrivano in maniera esauriente l'interazione fra l'esterno ed il sistema. Esse prendono il nome di *variabili di ingresso* o *input* del sistema e sono:
 - r_i è il flusso di veicoli in ingresso e definisce quanti veicoli si immettono, in un determinato intervallo di tempo, sulla carreggiata, al tempo t ed in i ;
 - s_i è il flusso di veicoli in uscita e definisce quanti veicoli fuoriescono, in un determinato intervallo di tempo, dalla carreggiata, al tempo t ed in i .
- Scegliere un insieme di grandezze statiche che descrivano in maniera esauriente quelle che sono le caratteristiche fisiche della carreggiata autostradale. Esse prendono il nome di parametri fisici del sistema e sono quelli introdotti nell'equazione dinamica della velocità;
- Definire in quale maniera gli elementi del fenomeno reale interagiscono e dipendono fra di loro. Gli stessi comportamenti dovrebbero essere descritti anche dal modello matematico. Le interazioni e le dipendenze fra tutte le grandezze in gioco dovranno trasformarsi in equazioni e funzioni matematiche che agiranno sulle variabili di stato del modello.

Il modello consente di compiere due tipi di analisi; una di queste è quella *simulativa* e consiste nell'osservare come il modello si comporta se sollecitato da particolari condizioni esterne, senza che queste debbano per forza verificarsi nella realtà. Infatti, potrebbe sicuramente interessare al gestore di una tratta stradale 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 analisi è di tipo *previsionale*, e consiste nel monitorare istante per istante le condizioni del traffico veicolare e da queste trarre importanti indicazioni sulla possibile evoluzione, nel breve futuro, del comportamento del sistema reale. Questo chiaramente permette di anticipare l'accadimento di fenomeni critici quali ingorghi o rallentamenti, eventualmente prevenirli, oppure, qualora non sia comunque possibile restare in una situazione di traffico scorrevole, attrezzarsi per affrontare nella maniera migliore la criticità.

È evidente che ciascuna delle due analisi richiede un contenuto informativo differente; in particolare, se il modello è utilizzato per uno scopo prettamente simulativo, l'inizializzazione delle variabili di stato riveste un ruolo molto marginale e addirittura è un passaggio che può essere sacrificato.

Se, invece, il modello è utilizzato come strumento previsionale on-line e real-time, la corretta inizializzazione delle variabili di stato, acquista un'importanza addirittura drastica. È evidente che, se l'intenzione è di avere una previsione per gli N passi di discretizzazione temporale successivi, con N abbastanza piccolo, la bontà della stima dipende quasi esclusivamente dalla bontà dell'inizializzazione delle variabili di stato.

In tal caso addirittura diventa necessario trovare un modo per stimare in maniera adeguata anche le variabili di ingresso del sistema. Per ottenere buoni risultati dalla simulazione previsionale occorre che l'inizializzazione delle variabili di ingresso all'inizio della simulazione sia la più precisa possibile, e che la stima dei valori futuri sia accurata e coerente con il successivo verificarsi nella realtà.

La qualità della stima delle variabili di traffico dipende oltre che della ricostruzione dello stato iniziale a cui il modello è particolarmente sensibile, dall'intervallo spaziale e temporale con cui viene determinato lo stato di traffico attuale o previsto della rete. Una buona norma che può guidare nella scelta è quella di considerare delle sezioni di lunghezza L e un avanzamento temporale Δt in modo tale che non vengano saltate delle sezioni: potrebbe infatti accadere che in tale passaggio corrente di veicoli potrebbe non risultare influenzata da eventuali incrementi di densità riscontrati a valle. Per tale ragione, si è scelto un intervallo spaziale di 100 m e un intervallo temporale di 2 secondi.

In conclusione si può affermare che l'accuratezza del modello dipende fortemente dagli intervalli spaziali e temporali con cui è effettuata la simulazione: il confronto dei risultati con dati di traffico ha mostrato un'eccellente prestazione dei modelli del secondo ordine anche nel caso di discretizzazioni di circa 500m e 15s.

In definitiva, per garantire un adeguato compromesso tra accuratezza e robustezza della simulazione, è necessario rispettare un legame tra i livelli di aggregazione delle variabili che garantisca che la corrente non sia più veloce delle interazioni che si vogliono rappresentare.

In altre parole, è necessario rispettare la seguente relazione:

$Dx/Dt > V_{max}$: 100m \rightarrow Dt=2s se V=50m/s

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} > v_{max}$$

che impone che la lunghezza del segmento in cui è suddivisa l'arteria Δx sia maggiore dello spazio $v_{max}\Delta t$ percorribile da un veicolo nell'intervallo di avanzamento della simulazione Δt .

In pratica, se si vuole un dettaglio spaziale di 100m, è necessario un dettaglio temporale di 2s, che assicura che anche un veicolo transitante ad una velocità di 50m/s, pari a 180km/h, non possa attraversare un intero segmento nel corso di un intervallo di aggiornamento della simulazione.

4.5 Specifiche del software prototipale

4.5.1 ARCHITETTURA DEL SOFTWARE

Il software di previsione del traffico si articola in tre moduli principali, cui sono demandate le funzioni di acquisizione ed elaborazione dei dati; simulazione del deflusso veicolare; aggiornamento delle previsioni di traffico.

L'acquisizione dei dati è una operazioni complessa che comprende: dati statici, relativi in particolare alla struttura della rete stradale; dati rilevati in linea, relativi al traffico rilevato in alcuni punti della rete; dati statistici, descrittivi delle condizioni di traffico abituali e necessari per l'integrazione dei dati rilevati in linea.

Il modello di deflusso simula il funzionamento della rete stradale: acquisisce i dati di domanda nelle sezioni di rilievo, ricostruisce il processo dinamico di interazione tra veicoli e fornisce in output il traffico (flussi) e le prestazioni della rete (velocità) in tutti gli elementi della rete.

La procedura di aggiornamento estrapola i risultati della simulazione del traffico negli intervalli temporali successivi, integrandoli eventualmente con altre informazioni rilevate in linea.

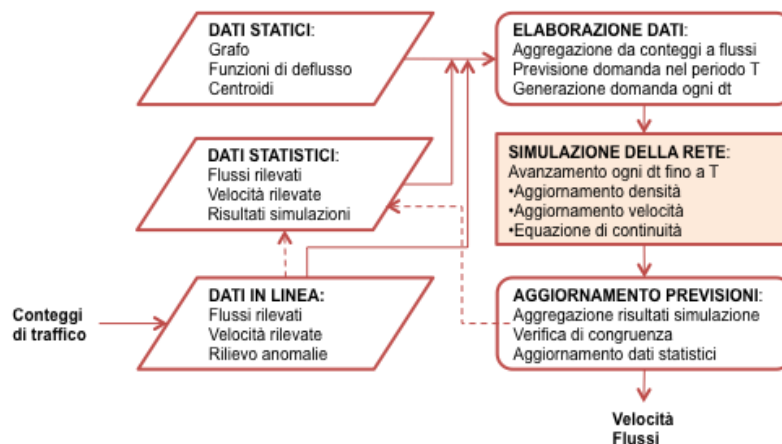


Figura 50– Architettura del software

4.5.2 PROCEDURA DI ELABORAZIONE DEI DATI

La procedura di elaborazione dei dati acquisisce flussi e velocità rilevate in tempo reale dalla rete di monitoraggio, li aggrega nel formato coerente con la rappresentazione modellistica, li confronta con la serie di dati statistici, ed applica un modello di stima della domanda nel periodo successivo.

4.5.2.1 Aggregazione dei dati di conteggio nell'intervallo $Dt=180s$

- Aggregazione nell'intervallo $Dt=180s$ dei conteggi FCD sugli archi x_j e calcolo del flusso equivalente in funzione del tasso di campionamento, della distanza percorsa e della lunghezza dell'arco L
- Aggregazione dei dati di flusso conteggiato nelle sezioni di rilievo nell'intervallo Dt
- Ricalibrazione del flusso stimato in funzione del flusso conteggiato nelle sezioni di rilievo

4.5.2.2 Previsione della domanda nell'intervallo di simulazione $T=1h$

- Stima della domanda mediante applicazione di un filtro esponenziale del flusso conteggiato nelle sezioni di ingresso alla rete negli ultimi k intervalli temporali ($Dt_{i-k}, Dt_{i-k+1}, \dots, Dt_i$)
- Espansione del flusso conteggiato nelle sezioni di ingresso alla rete negli intervalli temporali successivi (Dt_1, Dt_2, \dots, Dt_T) per il tutto il periodo T in funzione del profilo previsto statisticamente p_1, p_2, \dots, p_T
- Aggiornamento della stima del profilo p_i mediante applicazione di un filtro di media mobile del flusso conteggiato nelle sezioni di ingresso alla rete nell'ultimo intervallo temporale e nella serie storica

4.5.2.3 Ricampionamento dei flussi di domanda a $dt=5s$

- Distribuzione negli intervalli di avanzamento della simulazione $dt=5s$ in base ad estrazione casuale del flusso aggregato in Dt secondo il profilo storico prefissato i flussi di domanda

4.5.3 SIMULAZIONE DEL DEFLUSSO

La procedura di simulazione calcola i valori delle variabili di stato di ciascuna arteria della rete, con disaggregazione $dt=5s$, per tutto il periodo di simulazione $T=1h$.

4.5.3.1 Dati input (aggregazione nell'intervallo dt)

- Flussi di ingresso nelle sezioni al contorno e dai centroidi nell'intervallo dt
- Quota di flussi in uscita dalle sezioni al contorno e dai centroidi nell'intervallo dt

- Velocità nella sezione iniziale
- Densità nella sezione finale

4.5.3.2 Aggiornamento delle variabili di stato (per ogni intervallo dt)

- Calcolo della velocità di equilibrio di ciascun segmento mediante applicazione del modello di congestione allo stato stazionario a partire dai valori di densità dell'intervallo precedente
- Calcolo del flusso uscente da ciascun segmento mediante applicazione dell'equazione di stato
- Aggiornamento della densità nell'intervallo temporale successivo mediante applicazione dell'equazione di conservazione in funzione dei flussi entranti ed uscenti dall'arteria e da ciascun segmento
- Aggiornamento della velocità mediante applicazione dell'equazione dinamica che rappresenta la propagazione delle perturbazioni nella rete in funzione della densità a valle e del rilassamento dalla velocità di equilibrio
- Verifica delle condizioni di non negatività delle variabili di stato, flusso e densità e sua eventuale correzione

4.5.3.3 Dati di output (per ogni dt entro l'intervallo T)

- Velocità, densità e flusso uscente in ciascun segmento dell'arteria in ciascun intervallo di simulazione

4.5.4 PROCEDURA DI AGGIORNAMENTO DELLE PREVISIONI

La procedura di aggiornamento delle previsioni riceve i risultati della simulazione, li aggrega nel formato coerente con i dati rilevati, li confronta con la serie di dati statistici, ed applica un modello di stima della domanda nel periodo successivo.

4.5.4.1 Aggregazione dei risultati della simulazione

- Aggregazione in intervalli $Dt=180s$ dei flussi e delle velocità sugli archi x_j e fornitura delle previsioni di velocità e flusso previsti negli intervalli (Dt_1, Dt_2, \dots, Dt_T) per il tutto il periodo T

4.5.4.2 Verifica di congruenza

- Stima delle velocità e dei flussi previsti negli intervalli (Dt_1, Dt_2, \dots, Dt_T) mediante applicazione di un filtro esponenziale del flusso e delle velocità simulate con le previsioni statistiche negli intervalli temporali ($Dt_{i-k}, Dt_{i-k+1}, \dots, Dt_i$)
- Verifica della verosimiglianza di una condizione anomala

4.5.4.3 Fornitura dei risultati

- In caso di anomalia, applicazione del risultato del modello non filtrato; in condizioni ordinarie, applicazione della stima ottenuta con il filtro statistico.

5 Il caso di test

5.1 Scelta del caso di studio e dati disponibili

La rete oggetto di studio è il Grande Raccordo Anulare (GRA), classificato ufficialmente come A90, l'autostrada tangenziale, senza pedaggio, che circonda anularmente Roma. È caratterizzata dal tracciato circolare chiuso e senza discontinuità, con un diametro medio di circa 21 km, e lungo 68,223 km. È gestita direttamente dall'ANAS e percorsa giornalmente da circa 160000 veicoli (58 milioni l'anno), risultando tra le autostrade italiane con il più alto volume di traffico. [Fonte Anas]

5.2 Dati disponibili

I dati a disposizione sono stati estratti da un database principale, costituito da circa 78 milioni di posizioni GPS, ottenuto attraverso un monitoraggio continuo nel mese di maggio 2010 di una flotta veicolare di 100000 unità viaggianti su 20000 Km di rete stradale (cfr. Figura 51).



Figura 51– Grafo della rete stradale della Provincia di Roma

I dati di veicoli sonda sono stati già utilizzati in uno studio precedente per quantificare caratteristiche proprie di ogni arco della rete (capacità, velocità di flusso libero, tempi di percorrenza d'arco) e risalire a un inquadramento delle prestazioni offerte nelle diverse fasce temporali in termini di lunghezza del percorso medio, velocità medie, tempi di percorrenza, veicoli·Km, veicoli·ora. In Figura 52, Figura 53, Figura 54 sono riportati i risultati di tali analisi.

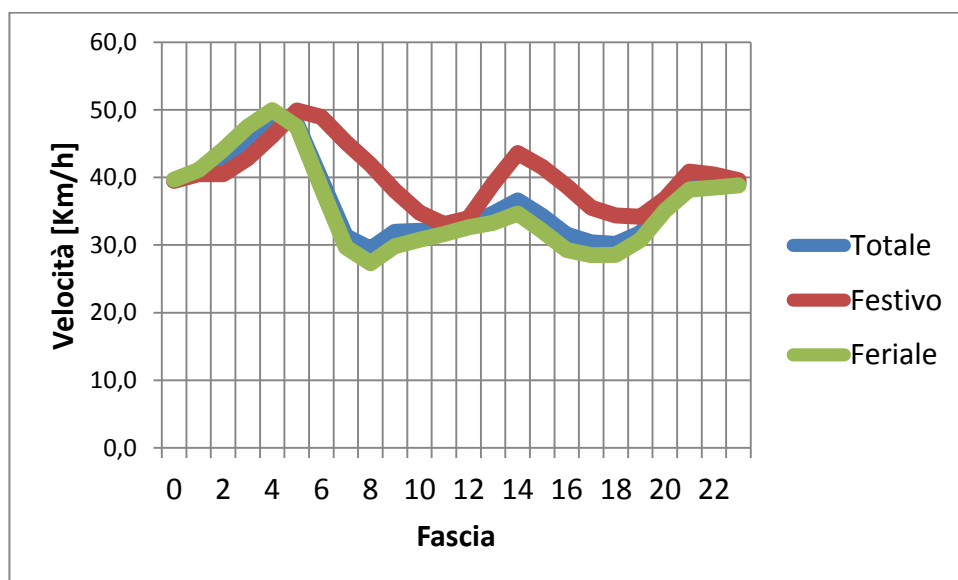
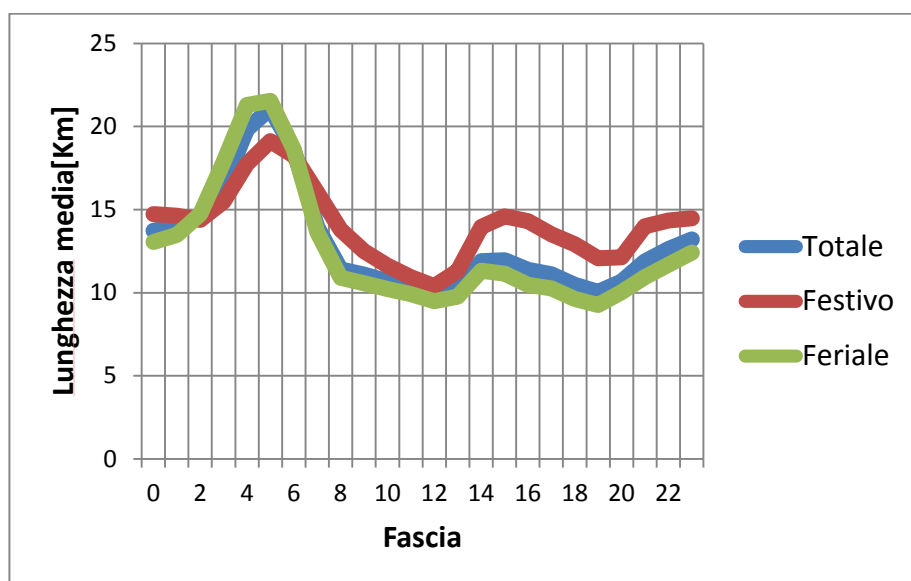


Figura 52 – Prestazioni della rete di trasporto della provincia di Roma: lunghezza e velocità media degli spostamenti nelle diverse fasce orarie

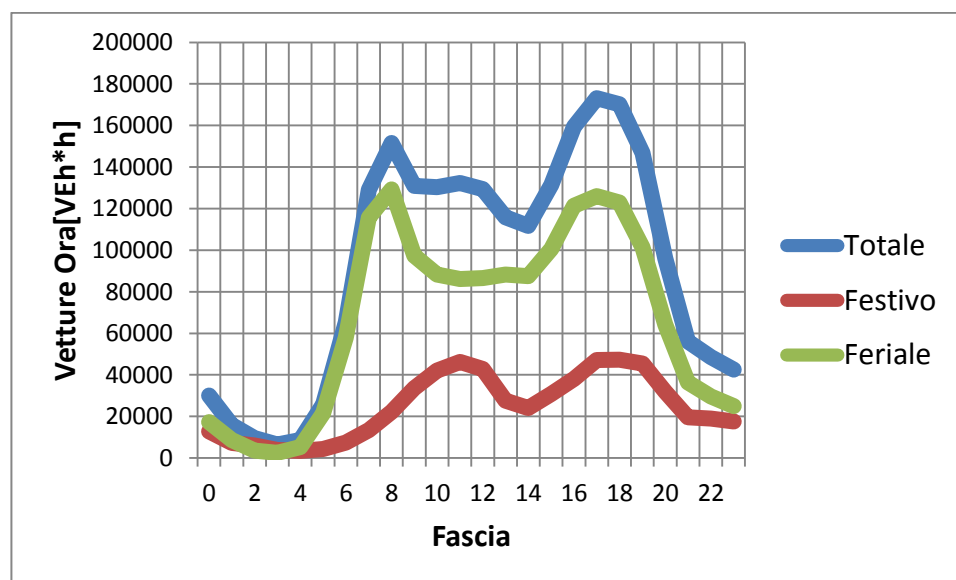
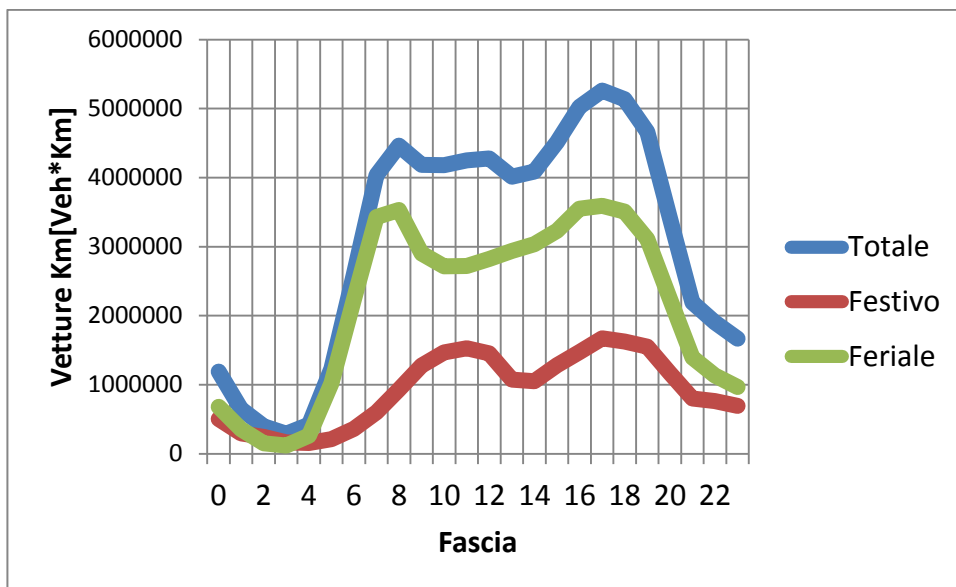


Figura 53– Prestazioni della rete di trasporto della provincia di Roma: indici delle percorrenze orarie e chilometriche

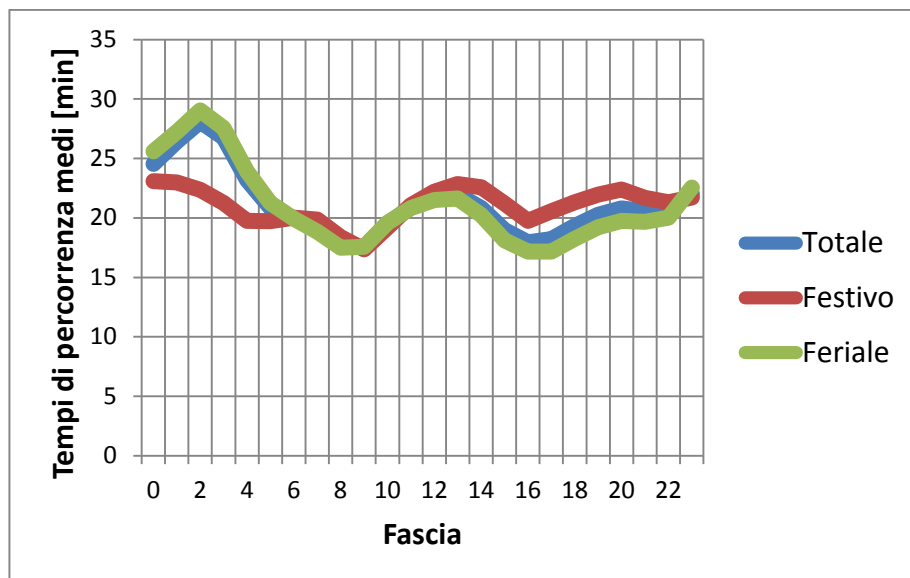


Figura 54– Analisi delle prestazioni della rete di trasporto della provincia di Roma: tempi medi di percorrenza nelle diverse fasce orarie delle giornate feriali e festive

Le caratteristiche della rete di studio e dei rilievi di grandezze microscopiche del traffico sono descritte in Figura 55, in cui si riporta sia il grafo della rete sia la struttura del database. Sono state ottenute circa 10.000.000 di posizioni di veicoli sonda su 1012 archi stradali.

Ci si è serviti di un secondo set di dati provenienti da rilievi di flussi veicolari, aggregati al minuto e già espressi in veh/h; le misure, ottenute mediante telecamere installate sull'infrastruttura, derivano dal monitoraggio del traffico nel periodo compreso tra il 10 ed il 23 maggio 2010 su 9 sezioni del GRA.

La disponibilità di dati di floating car è molto variabile nel tempo e ciò dipende da numerosi fattori (tra gli altri, il corretto funzionamento del dispositivo GPS), così come possono realizzarsi dei malfunzionamenti della strumentazione fissa.

Le grandezze del deflusso ottenute a valle dell'aggregazione, segnatamente velocità e flusso, sono assegnate alla sezione su cui si trovava il veicolo FCD oppure veniva rilevato da sensori fissi.

La qualità dei rilevatori mobili non è stata ancora estensivamente analizzata; la grande sfida è quella di riuscire a rappresentare gli stati di traffico di una corrente di veicoli utilizzando solamente una quota parte, contrariamente a quanto fatto da altre tipologie di sensori.

Il principale limite consiste invece nell'incapacità del campione di veicoli di rappresentare le reali condizioni di traffico e di ottenere informazioni affidabili su percorsi ricostruiti a partire da dati di posizione di una aliquota di veicoli della corrente; si dovrà, pertanto, verificare se il campione è statisticamente rappresentativo, ovvero se produce sul traffico gli stessi effetti indotti dal flusso totale di veicoli. Questa operazione, non conoscendo la composizione veicolare, può essere effettuata tramite il confronto dei flussi di veicoli sonda e di rilevatori fissi.

Per quanto riguarda i dati di posizionamento satellitare, è necessario effettuare una aggregazione di dati di tipo microscopico in grandezze macroscopiche per poter derivare il comportamento della corrente in forma aggregata, mentre per i sensori fissi si tratta solamente di mediare le grandezze già macroscopiche nell'intervallo che risulta conveniente per il confronto. Per tale motivo, verrà illustrata la metodologia di calcolo del flusso adottata.

In generale, lo svolgimento del lavoro ha coinvolto le seguenti operazioni:

- analisi dei dati disponibili ed opportuna aggregazione (condotta separatamente per i due set di dati) temporale delle grandezze di controllo, considerata la diversa natura dei due database utilizzati;
- analisi del deflusso condotto per stati stazionari e conseguente calibrazione delle curve di deflusso, basato solo su misure di posizionamento, dal momento che i dati di sensori fissi riguardano esclusivamente i flussi veicolari; questa operazione consente di interpretare il comportamento medio della corrente;
- calibrazione di un modello dinamico di traffico che permette di affrontare la dinamica del fenomeno; si tratta di un modello idrodinamico del secondo ordine poiché il modello lineare è uno strumento utile per l'analisi del traffico in condizioni stazionarie o approssimabile per stati stazionari e presuppone una serie di ipotesi che risultano poco realistiche per uno studio più dettagliato delle variazioni dinamiche del traffico.

5.3 *Analisi dei dati*

5.3.1 *PROFILI DI FLUSSO, VELOCITÀ E DENSITÀ VEICOLARE*

Sono stati sviluppati due codici di calcolo (in ambiente Matlab) per determinare le grandezze tipiche del deflusso, riferendosi separatamente a veicoli sonda o al flusso totale di autovetture.

I dati acquisiti con le telecamere erano già disponibili in termini di passaggi totali su tutte le corsie della carreggiata stradale ed organizzati in una matrice recante nelle righe i minuti e nelle colonne le ore costituenti ciascuna giornata. Per ogni minuto il valore dei passaggi è espresso in veicoli/ora.

Inoltre, si fa notare che le osservazioni di dati FCD sono state condotte nell'arco del mese di maggio 2010, mentre nell'altro solamente per 14 giorni. Pertanto, si può descrivere l'andamento del fenomeno con un differente numero di intervalli temporali (rispettivamente 2976 e 1344), ciascuno di 15 minuti.

I due codici sviluppati hanno consentito una completa rappresentazione dell'andamento delle variabili di traffico per tutti gli archi della rete di studio (nel caso di FCD), mentre nel secondo caso solo di quegli archi per cui erano disponibili i dati. Nel seguito, sarà analizzato dapprima l'andamento delle variabili di traffico nel tempo e successivamente le curve sperimentali di deflusso ottenute.

A scopo esemplificativo, nelle Figura 56 e Figura 57, sono riportati gli output per un arco stradale in cui sono disponibili rilievi sia microscopici che macroscopici, in modo tale da effettuare dei confronti, verificare la bontà dei risultati e dunque testare la capacità d'uso di veicoli sonda nella determinazione degli stati di traffico. L'arco in questione è il 953, situato in corrispondenza dell'intersezione tra la Circonvallazione Meridionale e la via del mare al Km 56+780.

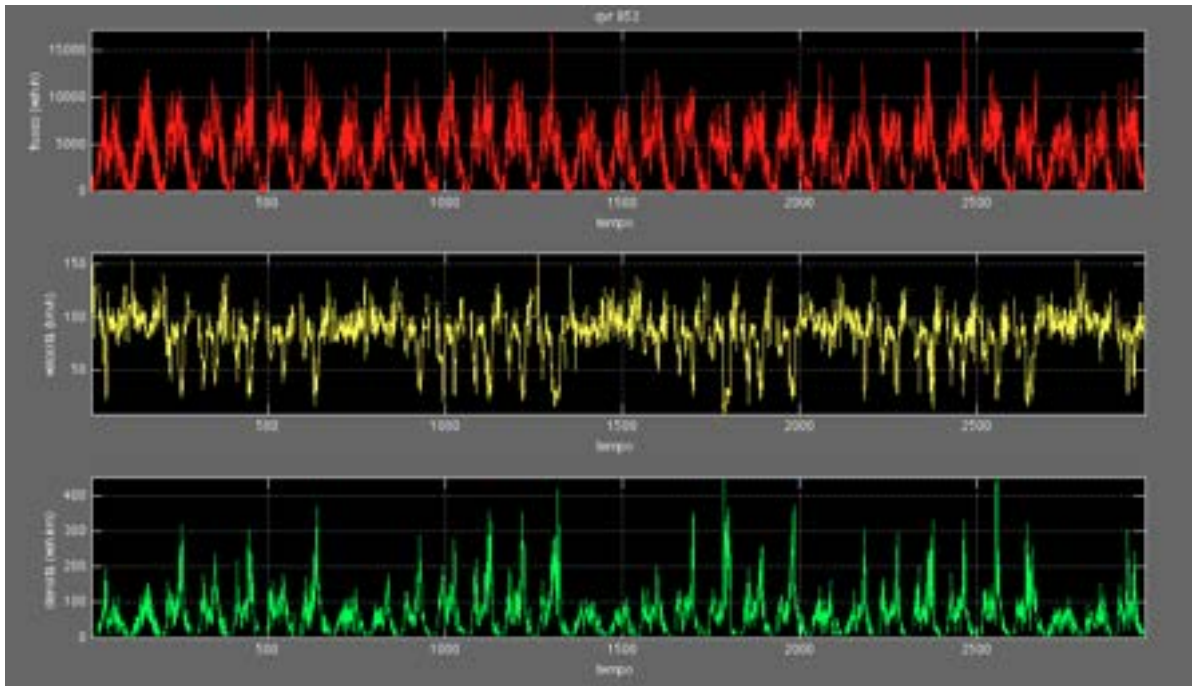


Figura 56 – Andamento di flusso, velocità e densità utilizzando dati di veicoli sonda

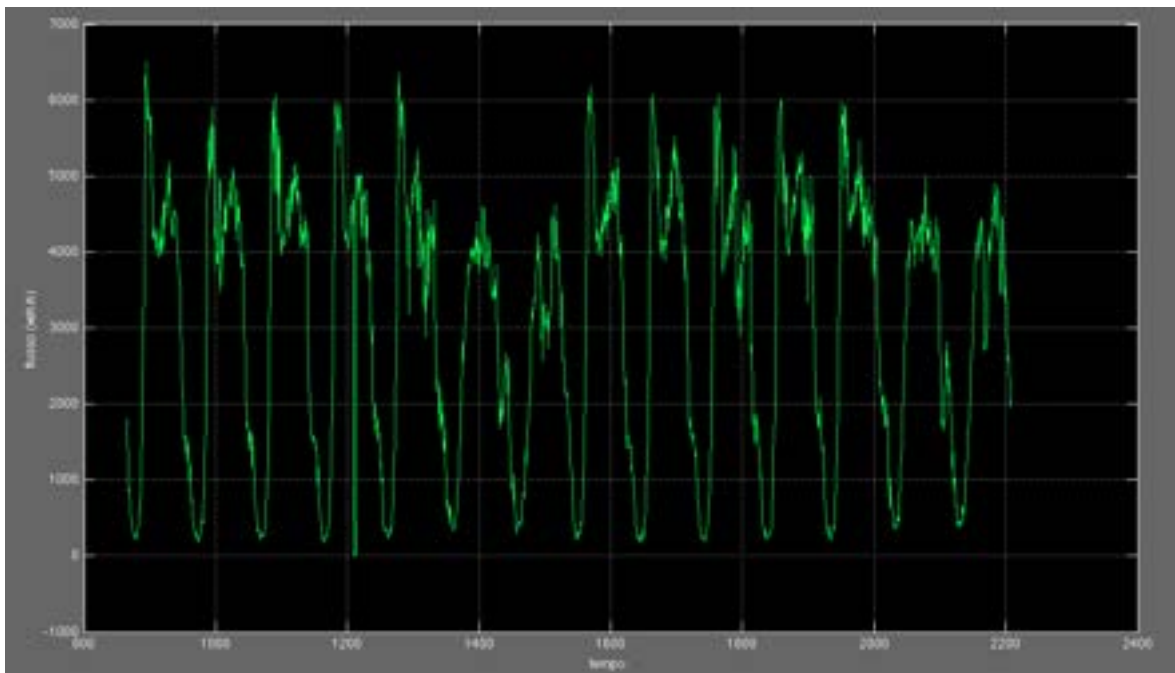


Figura 57 – Andamento di flusso, velocità e densità utilizzando dati di rilevatori fissi

In entrambi i casi, è possibile notare come l'andamento del flusso assuma la forma tipica di variazione della domanda di mobilità, nota come *dinamica intraperiodale*.

Si tratta, infatti, di variazioni della domanda di mobilità che avvengono all'interno di un periodo di analisi che comprende più periodi elementari di riferimento (ad esempio la variazione della domanda oraria nel corso della giornata o la variazione della domanda giornaliera tra i diversi giorni della settimana). Tali variazioni si ripetono ciclicamente come andamento, anche se i valori della domanda nei singoli sottoperiodi assumono valori diversi.

In Figura 58, i flussi d'arco sono diagrammati su un unico piano flusso-tempo: si nota come il flusso di veicoli sonda, inferito all'universo, sia nettamente superiore a quello calcolato coi sensori fissi, giungendo ad un valore fisicamente irrealistico, ben al di sopra del valore di atteso di capacità.

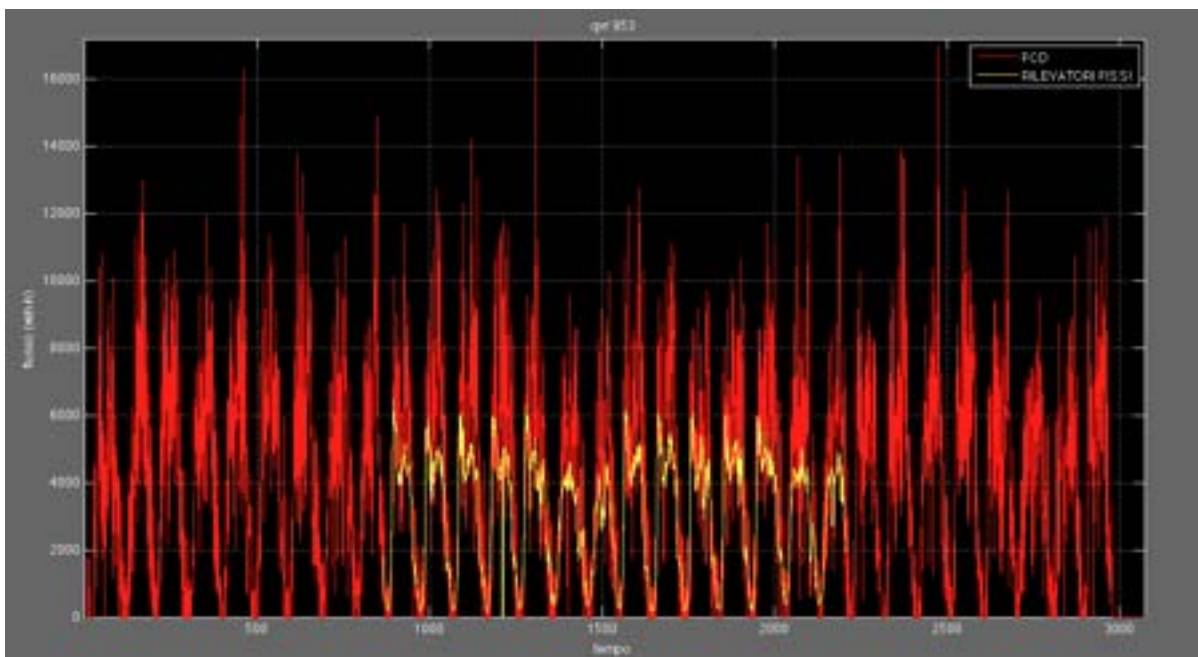


Figura 58– Confronto risultati rilevatori fissi/rilevatori mobili

Per ovviare a tale inconveniente, è stata applicata una semplice tecnica di filtraggio dei dati: i flussi dei rilevatori mobili sono stati normalizzati sui valori massimi dei flussi provenienti dai sensori fissi. L'adeguamento, effettuato per ogni sezione stradale, consente un adattamento reciproco dei due set di dati e permette di procedere con le analisi dello stato di traffico utilizzando i veicoli sonda.

I risultati di questa misura di correzione del flusso sono raffigurati in Figura 59, in cui è evidente l'effetto di ridimensionamento delle grandezze macroscopiche della corrente.

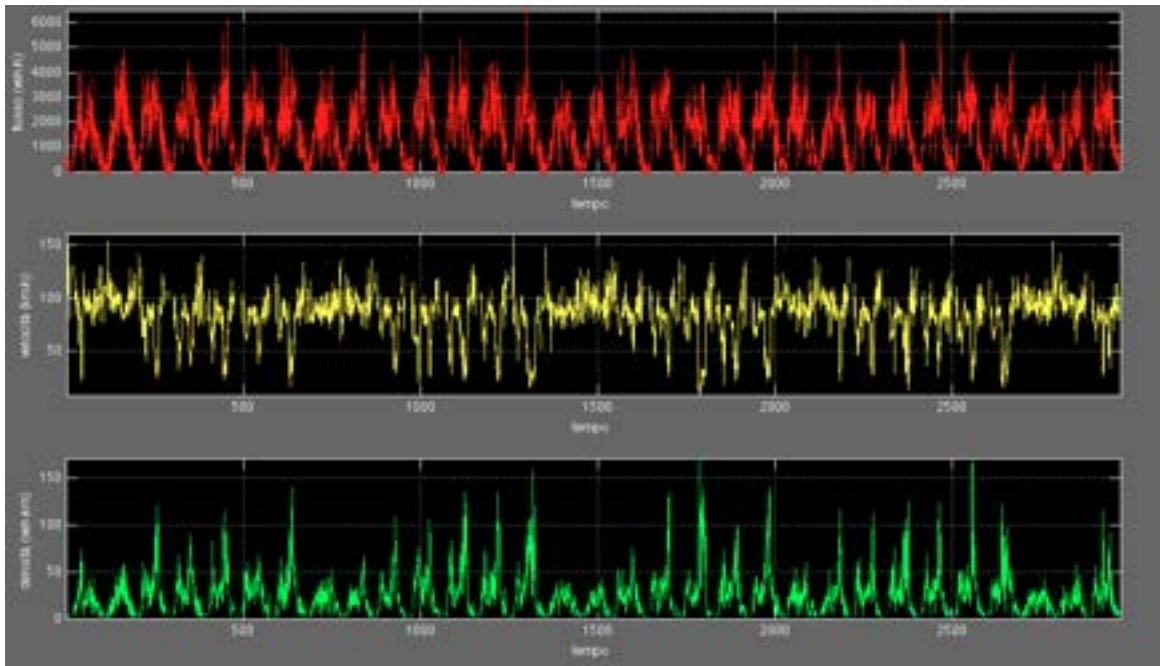


Figura 59 – Effetti della normalizzazione dei flussi

Il condizionamento degli utenti che si servono del sistema è invece ben rappresentato in Figura 60, da cui si deducono delle indicazioni sul grado di associazione delle caratteristiche macroscopiche del traffico in condizioni di flusso ininterrotto.

La relazione di equilibrio tra la densità e la velocità rappresenta un punto di partenza per analizzare il fenomeno della congestione; in corrispondenza di bassi valori di densità veicolare, si presenta una grande variabilità di comportamento della corrente di traffico (velocità compresa tra i 50 e i 150 Km/h), a riprova del fatto che in condizioni di flusso libero maggiormente si risente della variabilità di comportamento di guida dei conducenti.

All'aumentare della densità fino a un valore di 40 veh/km, si ha un progressivo assottigliamento della nuvola di punti finché, per valori via via crescenti, si innescano condizioni di deflusso congestionato, per cui i veicoli cominciano a risentire del condizionamento reciproco, espresso come riduzione della velocità media della corrente.

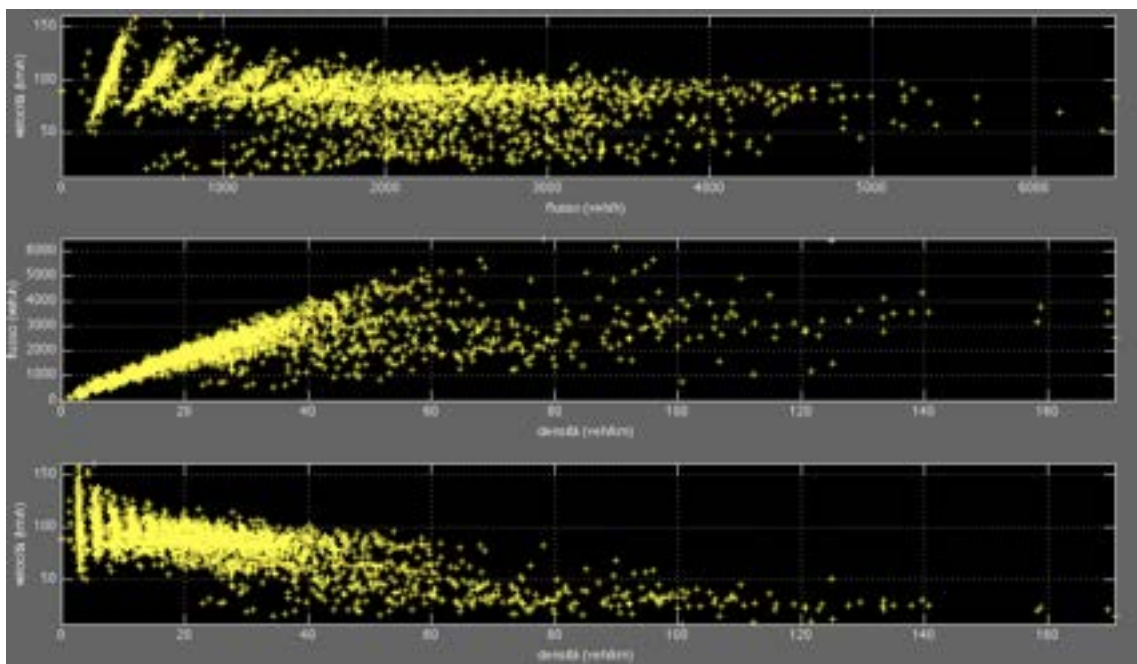


Figura 60 – Curve sperimentali di deflusso

Il fenomeno descritto è riprodotto anche nel piano flusso-densità in cui si ha una tendenza pressoché lineare in regime di flusso libero, oltre il quale si nota anche qui una notevole dispersione degli stati di traffico.

Infine, nel piano flusso-velocità, si evidenziano i due regimi di deflusso corrispondenti alla parte superiore e inferiore del diagramma; la relazione $q-v$ è molto utile per l'analisi operativa di un tronco stradale, poiché esprime le condizioni di deflusso direttamente mediante la velocità, che descrive le prestazioni dell'infrastruttura in termini di tempo di spostamento degli utenti, e di flusso che misura l'efficacia dell'infrastruttura in termini di utenti in movimento, ovvero di domanda di trasporto soddisfatta. Proprio per evidenziare l'andamento delle prestazioni al variare del flusso di veicoli, la relazione flusso-velocità è in genere rappresentata riportando la velocità in ordinata.

La conoscenza dei parametri allo stato critico, oltre che di densità massima e velocità libera caratterizza completamente il deflusso sul tronco analizzato e può essere acquisita solamente attraverso la calibrazione del modello stazionario.

5.4 Individuazione di situazioni anomale

Alla base del monitoraggio e controllo del traffico è l'individuazione di un intervallo desiderabile di funzionamento dell'infrastruttura, rappresentato dalle densità inferiori alla densità critica, dove flusso e densità sono monotonamente crescenti (Figura 61), mentre la velocità decresce con il flusso, mantenendosi però entro limiti accettabili. Oltre il punto critico, o meglio in un intervallo di questo da determinare mediante una specifica analisi di stabilità, si verificano fenomeni di instabilità della corrente veicolare

che producono una riduzione del flusso ed il crollo della velocità. A livello macroscopico questa condizione di deflusso può essere schematizzata come stati di deflusso con congestione elevata.

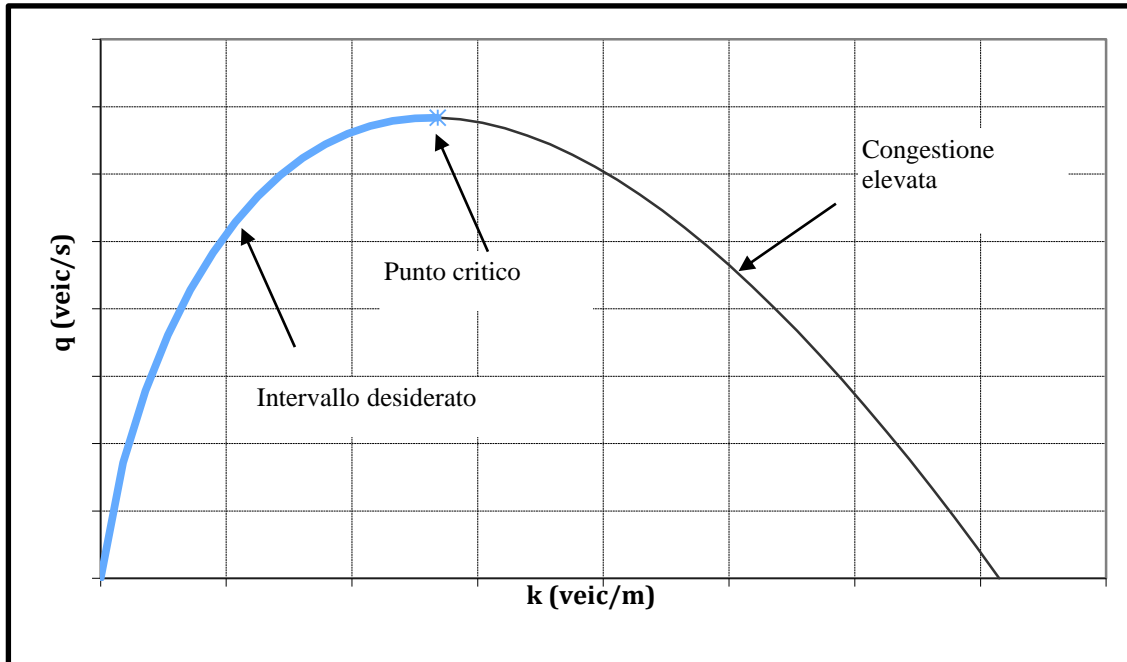


Figura 61 – Intervallo desiderato nel piano densità-flusso.

Le rampe di immissione rappresentano il principale elemento di disturbo alla corrente principale: quando la somma dei veicoli a monte e di quelli entranti eccede la capacità, si giunge alla saturazione dell'infrastruttura, il deflusso diventa instabile e la velocità diminuisce bruscamente di valore, fenomeno noto come "breakdown" del traffico.

L'individuazione delle situazioni anomale, dovute essenzialmente alla presenza di incidenti o all'incremento di traffico nell'ora di punta, costituisce il punto di partenza per analizzare e riprodurre l'andamento della circolazione e risalire a indicazioni utili per risolvere tali criticità. Per il caso in esame, ci si è concentrati su una giornata, il 28 maggio 2010, in cui si è verificato il congestionamento del tronco meridionale del GRA.

L'obiettivo del modello di traffico è proprio quello di riuscire a simulare la caduta di velocità prodotta dalla congestione della sezione di studio, che è ben interpretato dal profilo di velocità (ricavato dai dati FCD), riportato in Figura 62 per una delle sezioni stradali interessate dall'incremento di domanda sulle rampe, che va a sommarsi a quella proveniente da monte.

Si osserva un crollo della velocità media della corrente di durata significativa, che provoca una riduzione del flusso di veicoli in uscita dal tronco.

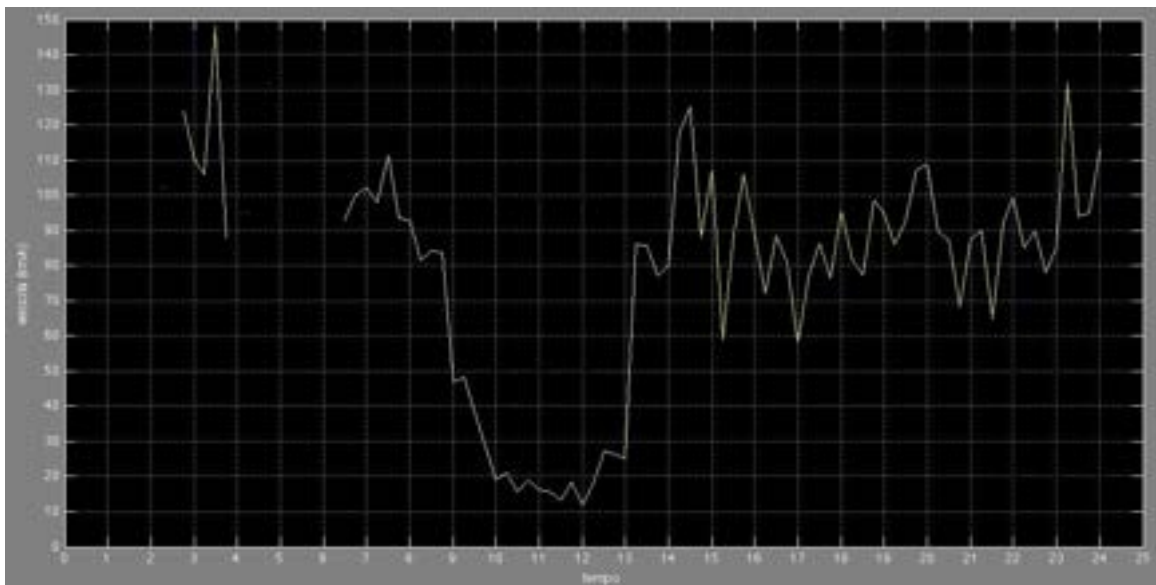


Figura 62 – Rappresentazione della caduta di velocità

Si osserva una riduzione della velocità per una durata di circa 2 ore, che riduce il massimo flusso di veicoli in uscita dall'arco, determinando una caduta di velocità dovuto essenzialmente ad un incremento della domanda sulle rampe, che sommandosi al flusso proveniente da monte porta l'arco alla saturazione e produce ovviamente un aumento del tempo totale speso dagli utenti e del ritardo.

Nella pratica, tale situazione produce una coda a monte, innescata dalla perturbazione indotta dai veicoli che accedono all'infrastruttura, e una riduzione del flusso massimo di uscita dell'ordine del 5-10% rispetto alla capacità della strada, per cui si renderebbe necessaria una regolazione degli accessi che consentirebbe un'immissione di veicoli dalla rampa tale da riportare il flusso smaltibile dalla sezione al valore di capacità.

5.5 Calibrazione delle curve di deflusso allo stato stazionario

I diagrammi fondamentali del traffico rappresentano delle relazioni tra le grandezze macroscopiche del deflusso allo stato stazionario e possono assumere andamenti diversi a seconda delle ipotesi con cui viene modellata la congestione; si è scelto di calibrare un diagramma velocità-densità (utilizzando dati FCD) per motivi di semplicità computazionale e facilità di rappresentazione.

La forma funzionale adottata utilizza come parametri la velocità libera, la densità critica e un esponente a che si assume pari a 2:

$$v = v_f \exp \left[-\frac{1}{a} \left(\frac{k}{k_{cr}} \right)^a \right]$$

Dopo aver effettuato una calibrazione sul totale di campioni disponibili per ogni sezione stradale, si è notata una forte sottostima dei parametri, dal momento che il processo di calibrazione si configura come un problema di minimizzazione (su tutte le osservazioni) di una funzione obiettivo espressa come errore quadratico medio tra valori osservati e quelli previsti dal modello. La curva velocità-densità è stata allora calibrata considerando solamente il 10% dei campioni più veloci, cosa che se da un lato riduce notevolmente i dati a disposizione, dall'altro fornisce un soddisfacente adattamento della curva alle osservazioni sperimentali, con un indice di determinazione R^2 pari a 0,8363 ed un errore standard (RMSE) di 9,385 km/h.

Le funzioni descrittive dello stato stazionario sono state stimate mediante la calibrazione a partire dai dati di posizione e velocità di veicoli dotati di GPS, utilizzati come sonde. In Figura 63 se ne riportano due esempi: il primo, illustrativo della relazione velocità-densità in una situazione di congestione elevata sul tronco preso in esame come caso di studio (diagramma in alto); il secondo del diagramma fondamentale flusso-densità in una condizione di congestione modesta, studiata in un altro esempio di tipo autostradale con dati acquisiti da sensori fissi (diagramma in basso).

Il processo di calibrazione consente di ottenere due importanti parametri relativi all'autostrada, velocità libera e densità critica, i quali sono utilizzati come punto

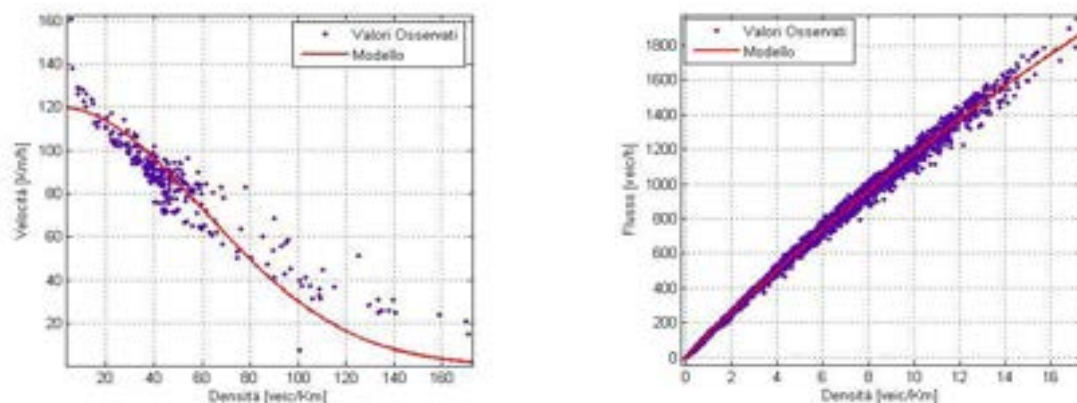


Figura 63– Risultati della calibrazione delle curve di deflusso

È facile notare come in condizioni di flusso libero le interazioni tra i veicoli sono piuttosto rare e piccole perturbazioni provocano effetti trascurabili, mentre in condizioni di congestionamento dell'arteria si riduca progressivamente la velocità della corrente all'aumentare della densità veicolare.

5.6 Calibrazione del modello dinamico

5.6.1 FORMULAZIONE DEL MODELLO ED ANALISI DELLE MODALITÀ DI APPLICAZIONE

Il modello dinamico tempo discreto del secondo ordine, descrive il comportamento medio di una rete stradale utilizzando la densità di traffico e la velocità media dei veicoli come variabili di stato.

La rete è rappresentata mediante un grafo orientato dove i vari link rappresentano tratti di strada con caratteristiche omogenee (numero di corsie costante, assenza di rampe di ingresso e/o di uscita, ecc.) ed i nodi collegano due o più link con caratteristiche geometriche diverse.

Se i vari link sono troppo lunghi è possibile che un eventuale ingorgo sia rilevato con un certo ritardo dipendente dalle osservazioni medie sull'intero tratto. Per tale ragione è possibile dividere ogni singolo link in un numero arbitrario di segmenti tutti di uguale lunghezza. Tale operazione rende la simulazione informativamente più ricca ma accresce il numero di variabili di stato (due per ogni segmento).

Le equazioni di stato che regolano la dinamica dell'i-esima sezione stradale sono:

$$k_i(t+1) = k_i(t) + \frac{\Delta t}{l_i n_i} [q_{i-1}(t) - q_i(t) + r_i(t) - s_i(t)]$$

$$v_i(t+1) = v_i(t) + \underbrace{\frac{\Delta t}{l_i} v_i(t) [v_{i+1}(t) - v_i(t)]}_C + \underbrace{\frac{\Delta t}{\tau} [v^o(k_i(t)) - v_i(t)]}_R - \underbrace{\frac{v_i \Delta t [k_{sat}(t) - k_i(t)]}{\tau l_i [k_i(t) + \kappa]}}_A - \left(\frac{\delta \Delta t}{l_i n_i} \right) \frac{r_i(t) v_i(t)}{k_i(t) + \kappa}$$

$$v^o(k) = v_f \exp \left[-\frac{1}{a} \left(\frac{k}{k_{cr}} \right)^a \right]$$

L'ultima relazione, chiamata diagramma fondamentale, è una formula empirica che descrive la relazione statistica fra densità e velocità cioè tra le due variabili di stato del segmento i-esimo. Com'è possibile notare, la funzione tende velocemente a zero al crescere della densità permettendo di modulare la velocità del link per simulare una situazione di traffico intenso o di traffico bloccato.

La relazione:

$$q_i(t) = k_i(t) v_i(t)$$

rappresenta il flusso di veicoli misurato in [veicoli/ora/corsia] che esce dal segmento i nell'intervallo $[t \cdot \Delta t, (t + 1) \cdot \Delta t]$ dove T è il passo temporale rispetto al quale vengono aggiornate le variabili di stato. Nell'equazione della velocità, τ rappresenta la costante di tempo, v è una costante anticipativa, κ una costante assunta fissa per tutti i link della rete e l_i la lunghezza del segmento i.

Il parametro k_{cr} rappresenta la densità critica, cioè quella densità per cui si verifica il massimo flusso nel link in esame, v_f è la velocità libera del flusso, cioè la velocità media alla quale procedono i veicoli in condizioni di bassa densità di traffico, e a è un parametro caratteristico della strada.

Il modello riportato è soggetto ad alcuni vincoli di facile comprensione. Quando la densità comincia a crescere fino a raggiungere un valore pari a k_{max} , per il quale la velocità si annulla e il flusso q di veicoli tende a zero, si instaurano le condizioni di massimo intasamento della strada in cui tutti i veicoli sono fermi. Inoltre se il flusso è uguale a zero e la densità è minore di quella massima la velocità media del tratto è nulla (non ho passaggio di veicoli). Questi semplici vincoli permettono di riprodurre due situazioni estreme del traffico veicolare su una strada che consentono di adeguare il modello alla realtà.

Come è possibile notare, il modello di deflusso dipende da un vettore di parametri $z = \tau, \nu, \rho_{cr}, v_f, a, \kappa, \delta$, assunto costante per tutta la rete, che deve essere stimato a partire da ingressi e uscite del modello. Questa procedura, risultando cruciale per la capacità di dare una interpretazione verosimile di un fenomeno fisico, sarà descritta nel seguito.

Il modello utilizzato nella ricerca, basandosi su una schematizzazione discreta dell'arteria e del tempo, descrive il comportamento di una corrente di traffico in forma aggregata utilizzando la densità veicolare e la velocità media come variabili descrittive dello stato del sistema, essendo i flussi entranti e uscenti le variabili di input.

Il modello è stato applicato e testato su diversi tronchi autostradali italiani; il caso di studio mostrato in Figura 64 è relativo ad una sezione del Grande Raccordo Anulare di Roma, situata in corrispondenza della Circonvallazione Meridionale tra la Via Appia Nuova e la Via del Mare. Ad esso sono riferiti i risultati mostrati nel seguito.

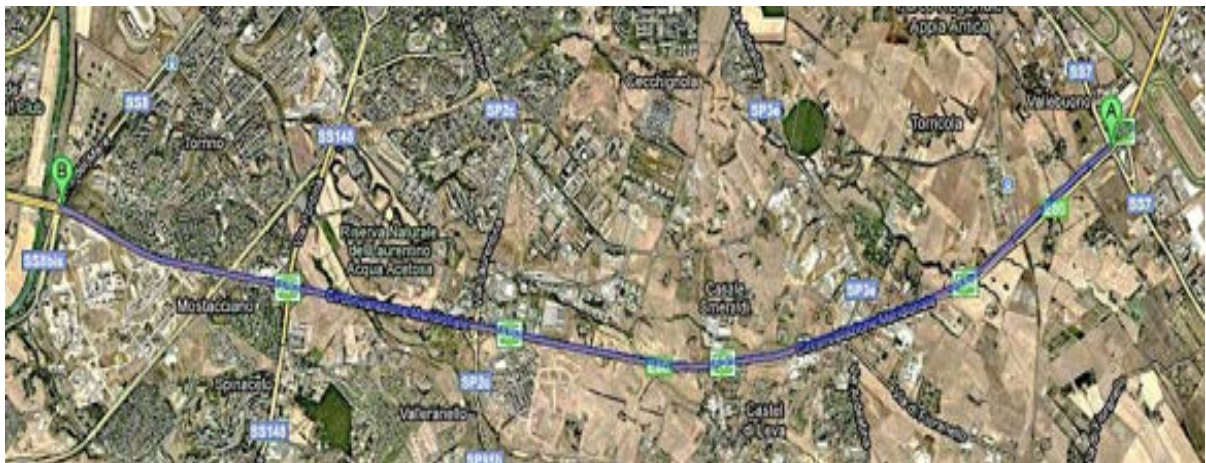


Figura 64 – Dettaglio dell'arteria utilizzata come caso di studio

In Figura 65 è rappresentato il modello di arteria adottato per il tronco meridionale del GRA con l'indicazione dei legami tra le grandezze rilevanti (flusso q , velocità v e densità ρ) per un tronco autostradale che presenta rampe di accesso ed egresso. È stata adottata una lunghezza delle sezioni di 100 m per il tronco di lunghezza complessiva di 12 km; il modello fornisce stime delle variabili di traffico con un aggiornamento di 2 s nel corso dell'intera giornata in cui si vuole simulare la caduta di capacità dell'arteria.

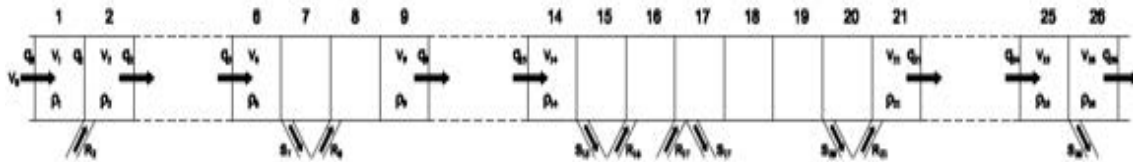


Figura 65– Schematizzazione dell'arteria per il modello di simulazione del deflusso stradale

Per i valori iniziali dei parametri del modello, si sono sfruttati i risultati di una precedente calibrazione off-line ad eccezione della velocità libera e della densità critica, che sono stati ottenuti dalla calibrazione del diagramma fondamentale $v(k)$ sui dati di posizionamento di veicoli sonda:

$$z = \tau, v, \rho_{cr}, v_f, a, \kappa, \delta = [36, 35, 82.5, 120, 2, 13, 0.8]$$

5.6.2 ESEMPLIFICAZIONE DEI RISULTATI E CALIBRAZIONE DEL MODELLO

La Figura 66 mostra gli output del modello di simulazione su una sezione dell'arteria in una giornata di particolare interesse, in cui si è verificata una condizione di congestione eccezionalmente estesa (tra le ore 9 e le ore 13).

Questa condizione di forte instabilità rappresenta un test critico per valutare la capacità del modello di riprodurre la dinamica del traffico in tutti i campi di variabilità. All'instabilità si deve aggiungere una forte componente di rumore dovuta all'errore statistico introdotto dall'inferenza all'universo del campione di veicoli sonda.

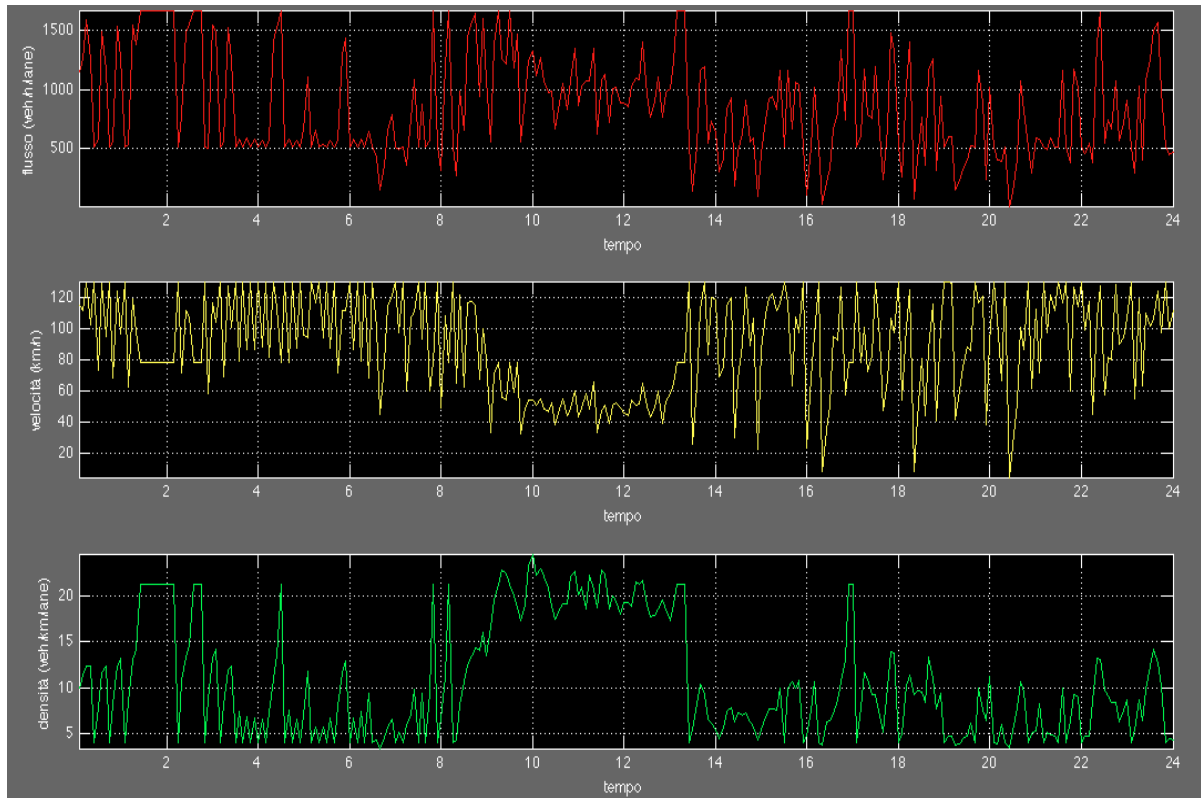


Figura 66– Output del modello

Nonostante il modello riesca a riprodurre le condizioni di traffico riscontrate sull'arteria, esiste un errore di stima delle variabili di traffico non sottovalutabile; è stata cercata allora una soluzione migliore attraverso un procedimento euristico di variazione dei parametri del modello ed adottando in ciascuna iterazione l'errore quadratico medio quale indicatore di controllo del processo.

I parametri utilizzati per testare la capacità del modello di riprodurre le condizioni di congestione riscontrate sull'arteria sono la costante di anticipazione v e il parametro δ , poiché essi sono quelli che maggiormente condizionano l'accuratezza delle stime. L'errore che ognuno di essi produce sulla valutazione dello stato di traffico è rappresentato in Figura 67.

La calibrazione dei due parametri ha consentito di ottenere dei risultati coerenti col reale comportamento del traffico; la Figura 68 mette in evidenza la caratteristica del modello di adeguarsi alla realtà.

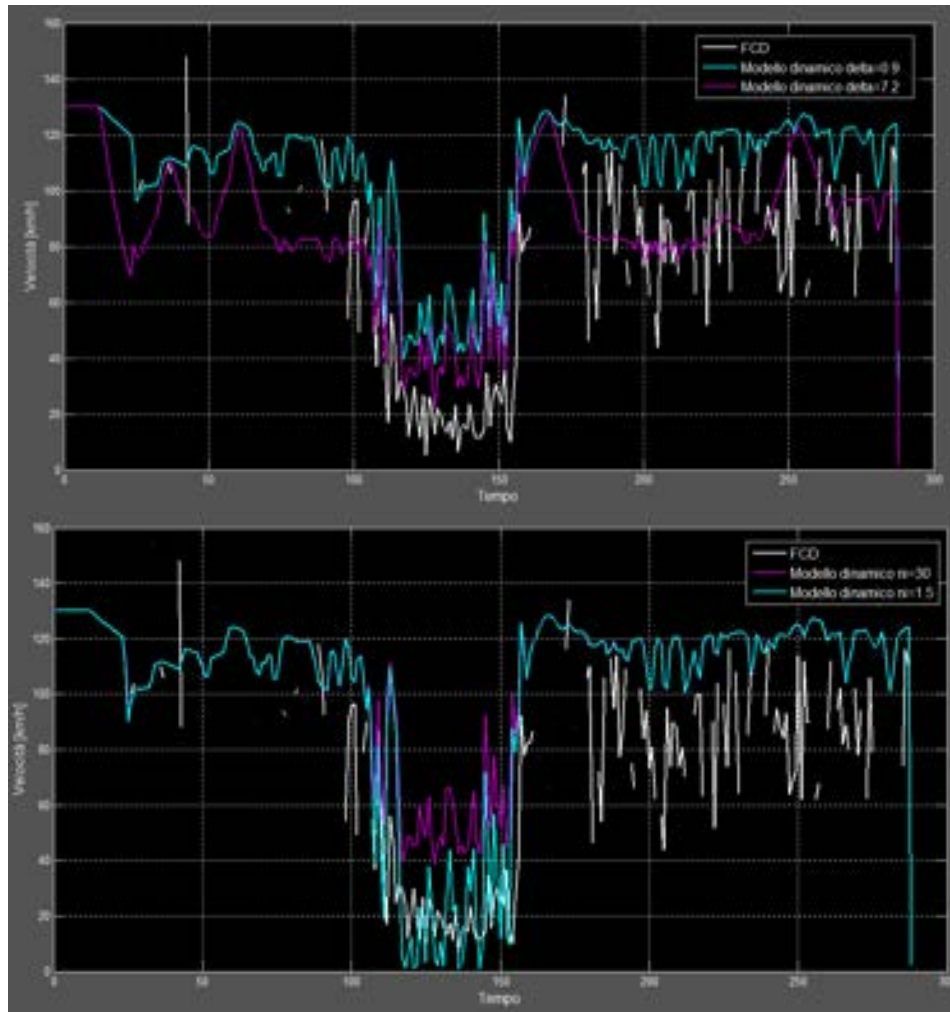


Figura 67 – Influenza dei flussi di rampa (diagramma in alto) e della costante di anticipazione (diagramma in basso) sugli output del modello

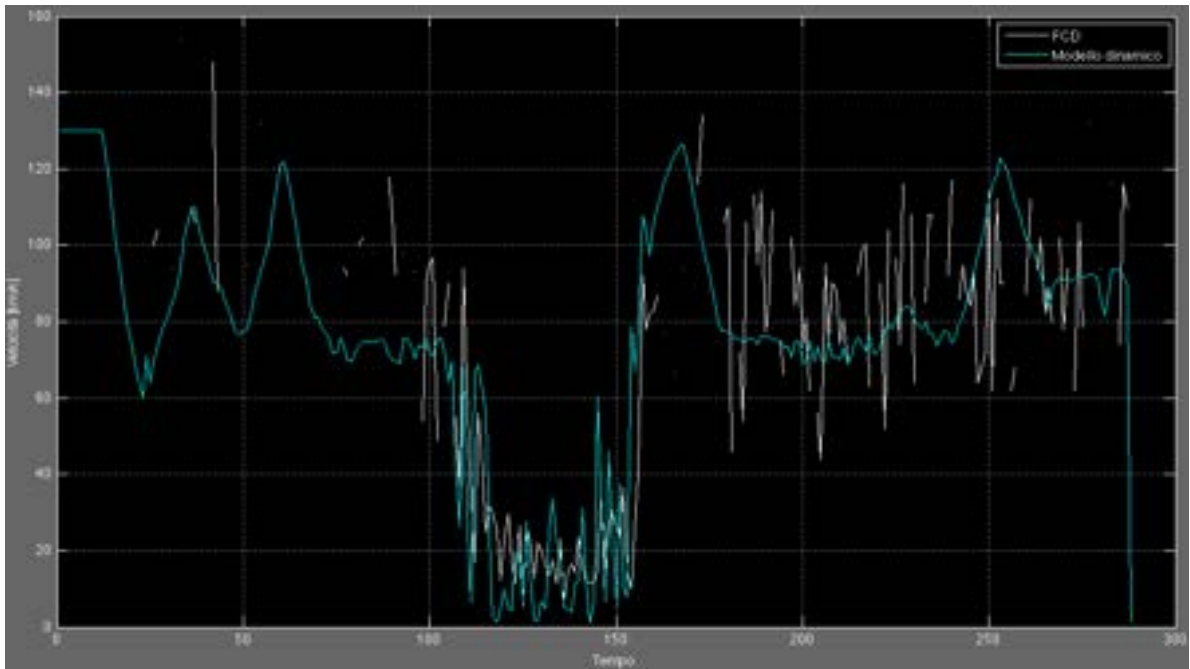


Figura 68– Risultato della calibrazione

Nel grafico di Figura 69 è riportato il confronto tra valori osservati e valori stimati della velocità nella sezione in esame. Nonostante le difficoltà dovute alla presenza del forte rumore e alle condizioni di instabilità, che producono una notevole dispersione dei dati nel campo di elevate densità, il modello mostra una buona capacità di riprodurre i valori osservati ($R^2=0,84$).

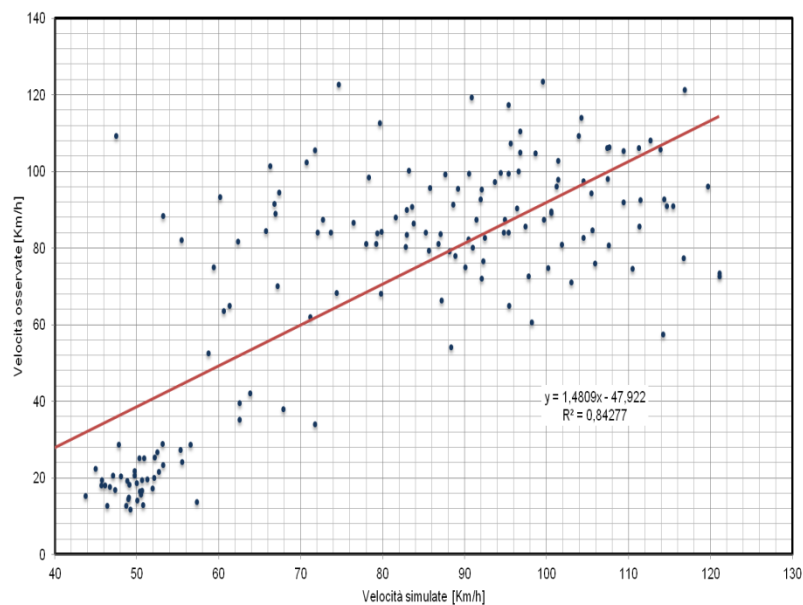


Figura 69– Calibrazione del modello

5.7 Applicazione in previsione e validazione del modello

5.7.1 MODALITÀ DI APPLICAZIONE IN PREVISIONE

Il modello calibrato è stato applicato in previsione off-line al tronco meridionale del GRA nel giorno 12 maggio 2010. Per comodità di esposizione si riporta in Figura 70 l'arteria di studio, in cui sono evidenziati con dei cerchi rossi all'inizio e alla fine del tronco rispettivamente l'input e l'output del modello di previsione; in particolare, in corrispondenza della sezione di uscita viene effettuato il check sulla accuratezza dei risultati ottenuti in fase di previsione, mediante il confronto coi dati raccolti dalla spira presente.

In maniera del tutto equivalente a quanto previsto in fase di calibrazione, il modello che richiede la conoscenza della domanda proveniente da monte (nella prima sezione) e di quella presente sulle rampe, è in grado di restituire in uscita i valori delle grandezze macroscopiche su tutte le sezioni dell'arteria e in ogni intervallo di avanzamento della simulazione.

L'ultima fase dell'analisi prevede la *validazione* che consiste nel testare la capacità di riprodurre fenomeni tipici del deflusso con un sufficiente grado di accuratezza, utilizzando dati diversi da quelli utilizzati in calibrazione.

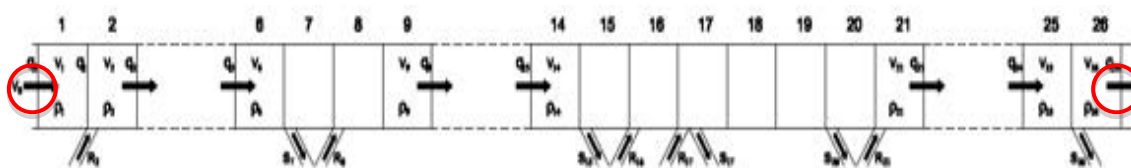


Figura 70– Arteria di studio: in rosso sono evidenziate le posizioni dei sensori che forniscono i dati di input (a sinistra) e di output, utilizzati per la validazione (a destra)

I dati di input utilizzati per alimentare il modello in previsione sono stati dedotti a partire dai dati di veicoli sonda (per la stima delle velocità e dei flussi di rampa) e dalla spira induttiva situata nella sezione di ingresso (per i flussi di ingresso) del tronco in analisi.

Il caricamento nella prima sezione è ottenuto attraverso la stima nell'intervallo di simulazione dei dati di flusso veicolare, disponibili dai rilievi della grandezza tramite la prima spira, e di velocità medie, derivate dall'inferenza all'universo delle velocità relative al campione di veicoli sonda. I profili di flusso sono stati sottoposti a tecniche di previsione, basate su rilievi di sensori fissi, e al trattamento del dato al fine renderlo compatibile con l'applicazione modellistica; quest'ultima operazione consiste nell'adeguamento del formato del dato a quello richiesto dall'algoritmo di simulazione, che procede con un avanzamento di 5 s. Le previsioni di velocità nella sezione iniziale sono state ottenute in maniera del tutto analoga, considerando il campione di velocità reso disponibile dal monitoraggio delle sonde.

Nel seguito sono elencate con maggiore dettaglio le sole operazioni previste dalla procedura per la previsione dei flussi entranti e uscenti dalle rampe:

- aggregazione nell'intervallo Dt ($1/Dt$ è la frequenza di trasmissione) dei conteggi FCD sugli archi e calcolo del flusso equivalente in funzione del tasso di campionamento, della distanza percorsa e della lunghezza dell'arco;
- aggregazione dei dati di flusso conteggiato nelle sezioni di rilievo nell'intervallo Dt ;
- ricalibrazione del flusso stimato in funzione del flusso conteggiato nelle sezioni di rilievo;
- stima della domanda mediante applicazione di un filtro esponenziale del flusso conteggiato nelle sezioni di ingresso alla rete negli ultimi k intervalli temporali ($Dt_{i-k}, Dt_{i-k+1}, \dots, Dt_i$);
- espansione del flusso conteggiato nelle sezioni di ingresso alla rete negli intervalli temporali successivi (Dt_1, Dt_2, \dots, Dt_T) per il tutto il periodo T in funzione del profilo previsto statisticamente p_1, p_2, \dots, p_T ;
- aggiornamento della stima del profilo p_i mediante applicazione di un filtro di media mobile del flusso conteggiato nelle sezioni di ingresso alla rete nell'ultimo intervallo temporale e nella serie storica;
- ricampionamento dei flussi di domanda negli intervalli di avanzamento della simulazione $dt=5s$.

In questa prima fase di sviluppo della procedura le previsioni dei flussi e delle velocità di input sono state calcolate sulla base dei valori osservati nelle settimane precedenti, mentre è in corso la messa a punto della procedura di filtro dei dati.

L'algoritmo di simulazione sviluppato ha consentito la determinazione delle stime previste, nel corso di un'intera giornata, di flusso, velocità e densità per ciascun segmento dell'arteria con un avanzamento temporale pari a 5s. Le Figura 71 e Figura 72 illustra un esempio, rispettivamente su flussi e velocità, dei risultati ottenuti dall'applicazione in previsione su 4 sezioni consecutive.

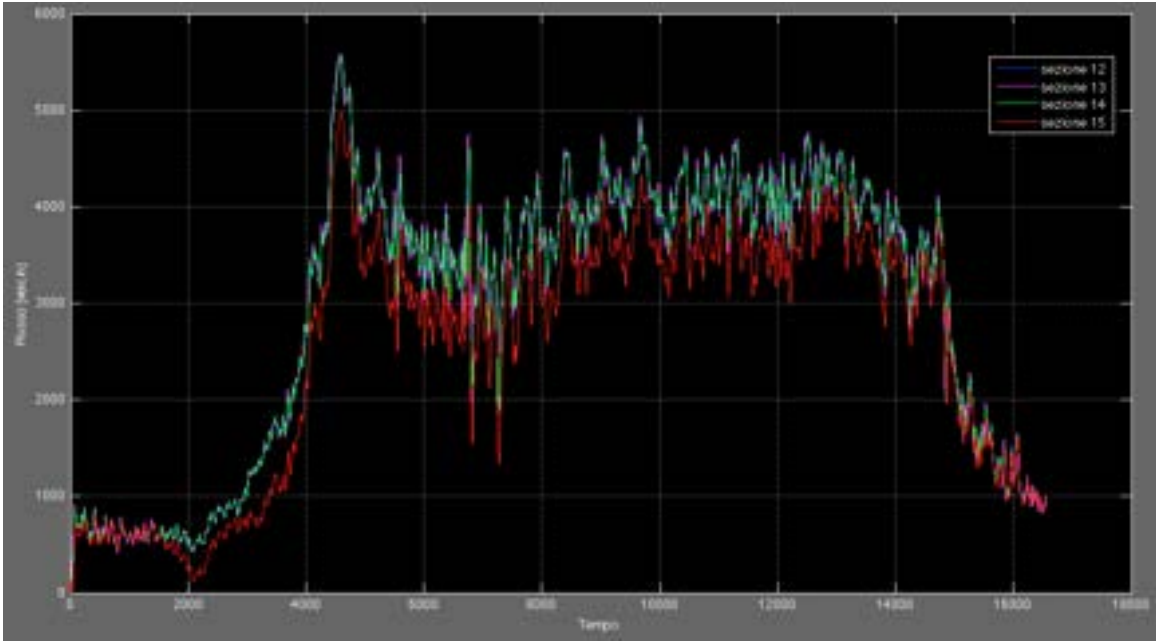


Figura 71– Output del modello di previsione del traffico: andamento temporale del flusso in 4 diverse sezioni

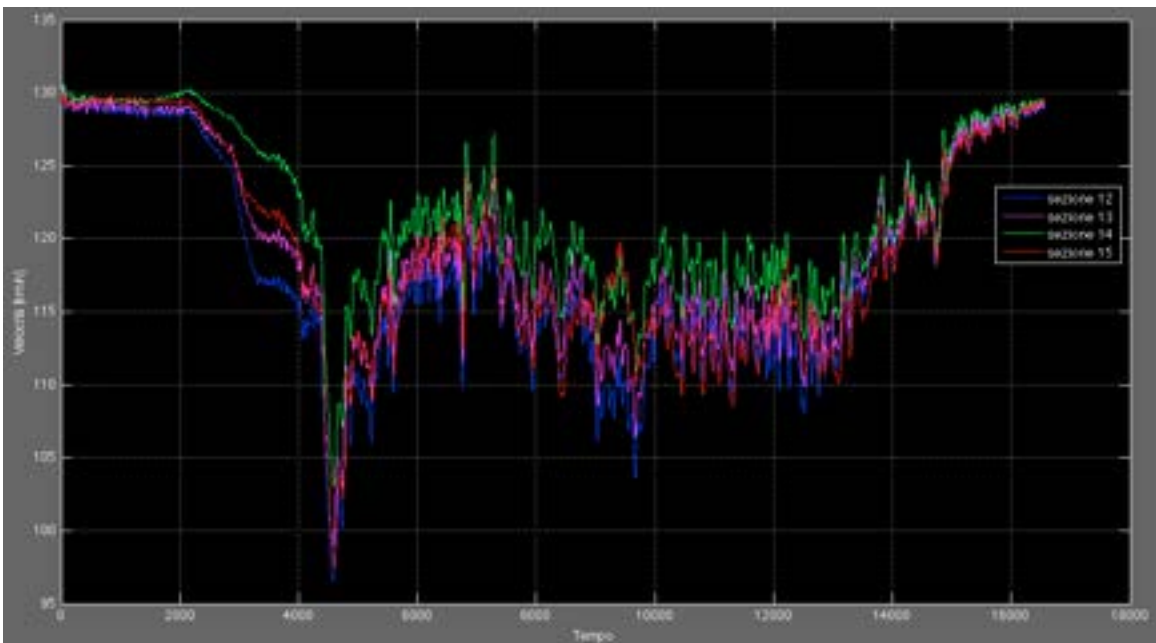


Figura 72– Output del modello di previsione del traffico: andamento temporale della velocità in 4 diverse sezioni

5.7.2 VALIDAZIONE DEL MODELLO IN PREVISIONE

Ciò che è rilevante dal punto di vista operativo è la capacità del modello di prevedere il valore massimo di flusso osservabile nell'ora di punta; è compito della validazione quello di mostrare la capacità di riprodurre il dato osservato in tale fascia oraria.

Per il caso in esame, con la procedura di previsione, si è eseguita la validazione del modello, ovvero si è testata l'accuratezza degli stati di traffico previsti, pur consapevoli della grossolana approssimazione dei dati di input, stimati in base alla media delle osservazioni campionarie degli FCD della settimana precedente. Invece, sono stati utilizzati per la validazione dell'output i dati del traffico complessivo rilevato dalle spire presenti all'ultima sezione del tronco. In Figura 73 si riporta un diagramma flusso-tempo per l'intera giornata di studio: sono messi a confronto gli output di flusso del modello coi dati della spira, entrambi aggregati con un intervallo di 5 minuti.

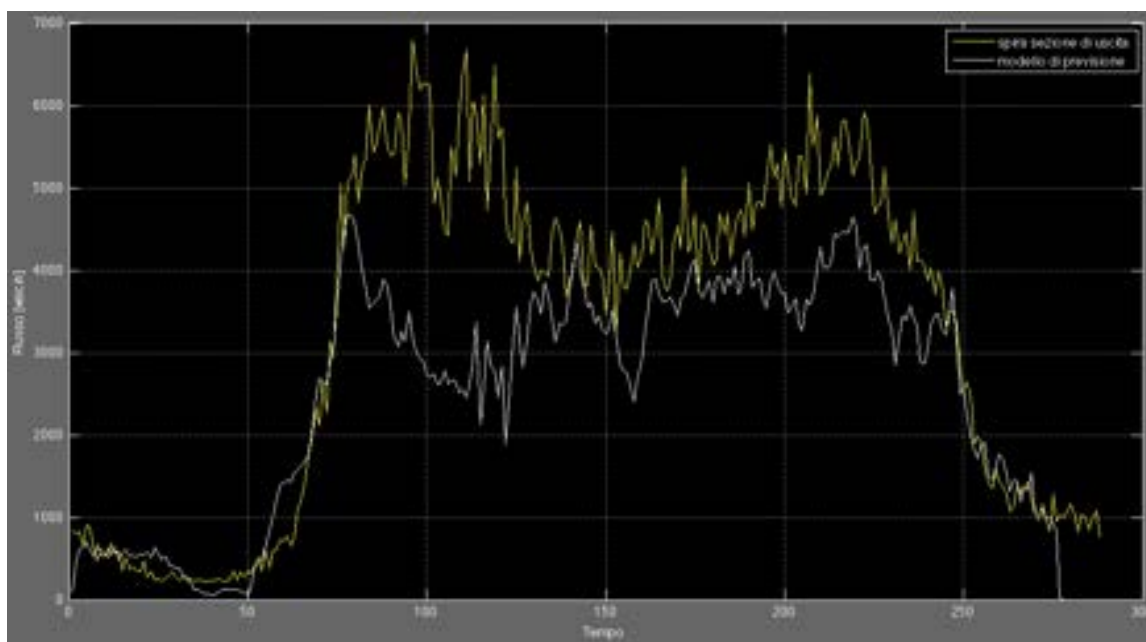


Figura 73– Validazione del modello: confronto tra flussi osservati e flussi previsti in uscita in corrispondenza di dati di input non filtrati

Nonostante il modello riesca in media a riprodurre in maniera piuttosto accettabile l'andamento del traffico, si riscontra nell'ora di punta un errore di stima di rilevante entità; ciò è dovuto principalmente all'attendibilità e disponibilità dei dati di input, che influiscono sulla valutazione delle condizioni di ingresso, rappresentate dai flussi sulle rampe di ingresso e uscita.

L'errore che deriva dalla stima (mediante dati FCD) della domanda sulle rampe è dovuto principalmente al campionamento, alla ricezione del segnale GPS e alla modalità di trasmissione delle posizioni dei veicoli (ogni 30 secondi oppure ogni 2

chilometri). È proprio in corrispondenza delle rampe che si ha il passaggio da una modalità all'altra.

A conferma di ciò si deve notare che un veicolo sulla rete principale fornisce una trasmissione ogni 12 minuti, mentre un veicolo sulla rete secondaria, ipotizzando una velocità media di 36m/s (100km/h), fornisce una trasmissione ogni 22 minuti.

Pertanto, il basso tasso di campionamento temporale non consente al sistema di effettuare previsioni in tempo reale utilizzando quale unica fonte di informazione il monitoraggio tramite veicoli sonda. Questa fonte di informazione va quindi integrata con dati ottenuti da osservazioni o più frequenti o più aggregate, ottenute ad esempio con un modello di assegnazione su rete a partire da dati di domanda origine-destinazione. Al contrario, l'elevato tasso di campionamento spaziale fornisce indicazioni sulle abitudini di mobilità degli utenti, potenzialmente utili per la pianificazione del sistema di trasporto.

5.7.3 ANALISI DELLE FONTI DI ERRORE

La Figura 74 mostra l'entità dell'errore che si commette nella valutazione dei valori previsti sulla base delle osservazioni precedenti dei flussi orari di ingresso (grafico in alto) e di uscita (grafico in basso) rispetto ai valori realmente osservati. I valori diagrammati sono relativi rispettivamente ad una rampa di accesso ed ad una di uscita.

In Figura 75, viene messo in evidenza lo scostamento tra la somma, nel corso dell'intera giornata, dei flussi stimati su tutte le rampe di accesso (grafico in alto) e di egresso (grafico in basso) rispetto ai valori stimati in base alle osservazioni delle sonde veicolari.

Le figure mettono in risalto come il flusso in ingresso sia fortemente sovrastimato rispetto al dato disponibile; tale tendenza si inverte per le rampe di uscita.

Nonostante le previsioni siano imprecise, il modello riesce a riprodurre bene i dati osservati in alcune fasce orarie, ad eccezione soprattutto dell'ora di punta.

Per tale ragione, è in fase di sviluppo una procedura automatizzata che sia in grado di ricevere dati in tempo reale da veicoli sonda e da sensori fissi, immagazzinarli e utilizzarli come strumento di correzione dei flussi di rampa; questo metodo, che prevede un funzionamento on-line, aggiornerà il flusso delle rampe nei successivi intervalli di avanzamento della simulazione in modo da ottenere delle stime più precise delle grandezze del deflusso sulle sezioni del tronco di studio.

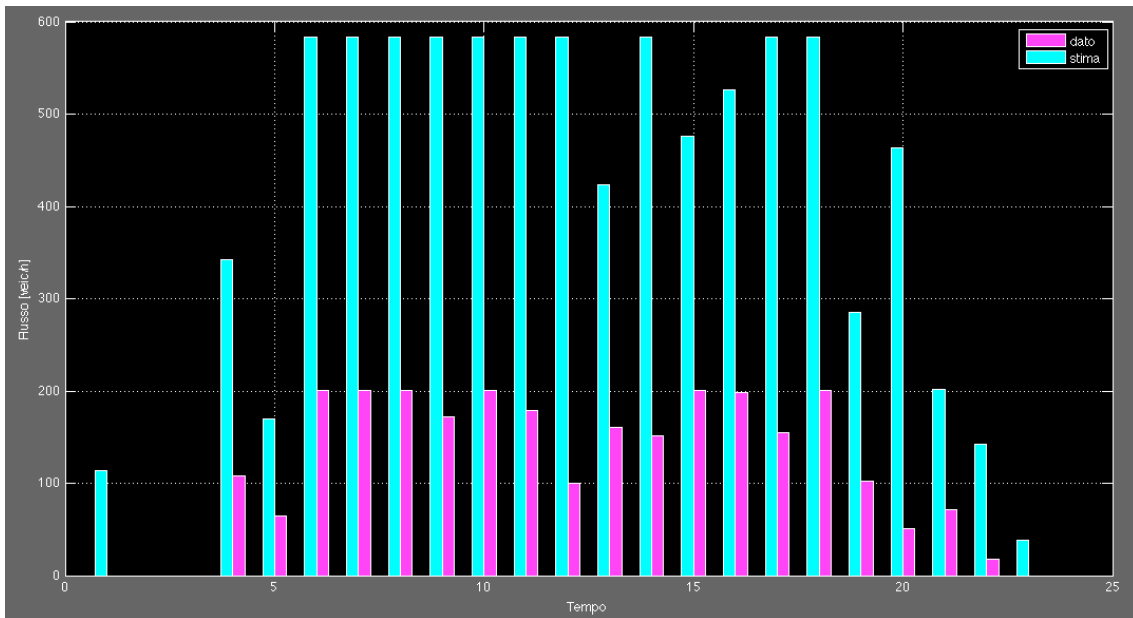
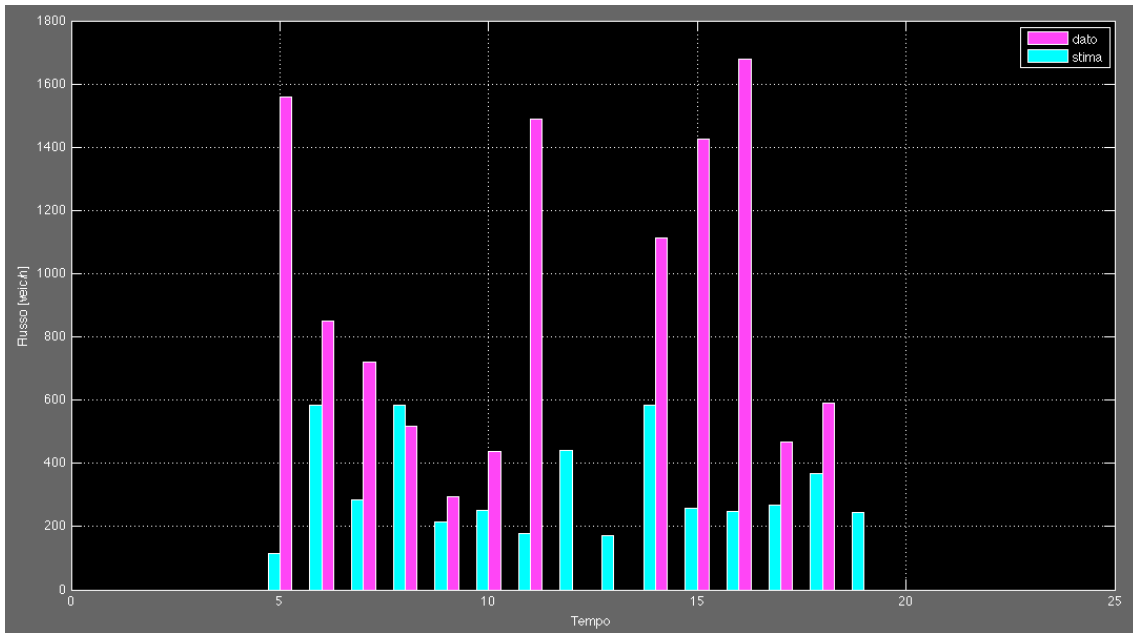


Figura 74 – Andamento nel tempo dei flussi su una rampa di ingresso (in alto) e una di uscita (in basso) utilizzati per la previsione (curva in celeste) e osservati (curva in viola)

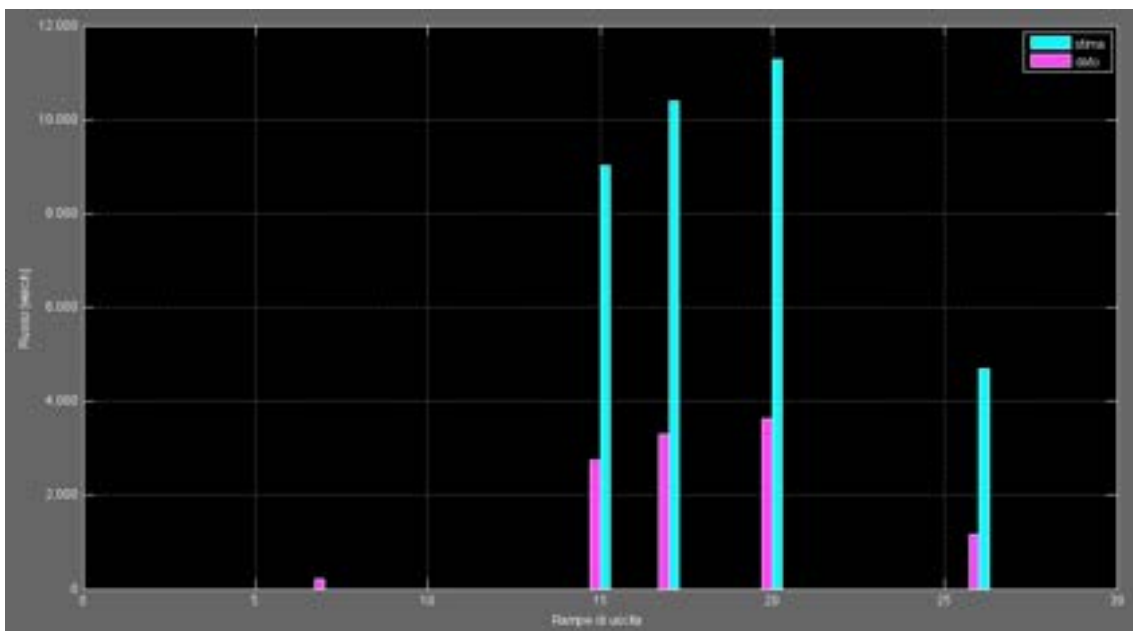
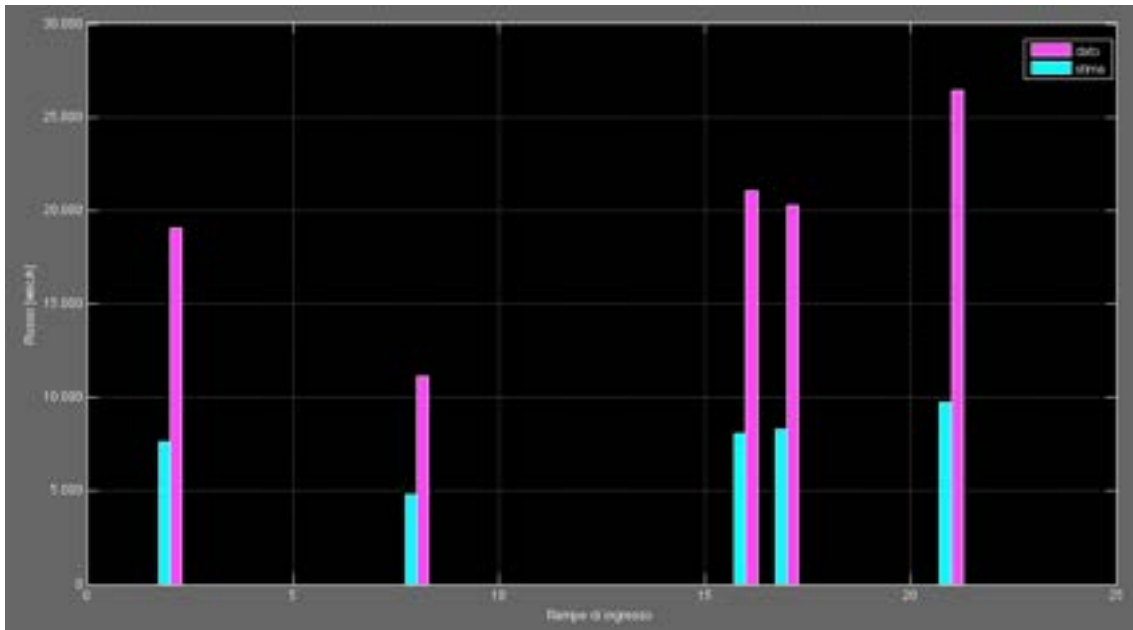


Figura 75 – Andamento dei flussi totali giornalieri su tutte le rampe di ingresso (in alto) e di uscita (in basso) utilizzati per la previsione (curva in celeste) e osservati (curva in viola)

6 Conclusioni

La previsione delle condizioni di traffico nel breve termine rappresenta un processo di fondamentale importanza nell'individuazione delle diverse strategie di regolazione del traffico.

L'uso della rete elettrica di illuminazione stradale per il monitoraggio del traffico veicolare sulla rete consente di attivare due tipologie complementari di sinergie:

- da una parte, adattare l'intensità dell'illuminazione alle caratteristiche del traffico, così da ridurre i consumi energetici, adattando dinamicamente i livelli di illuminazione ai requisiti normativi legati al flusso veicolare;
- dall'altra, utilizzare la rete di illuminazione come scheletro di supporto fisico e alla trasmissione delle informazioni del sistema di monitoraggio, così da realizzare una rete di sensori eccezionalmente densa e connessa.

L'oggetto della ricerca è stato quindi lo sviluppo di un modello di simulazione del traffico veicolare che consenta di acquisire dati anche online da un sistema di monitoraggio e di fornire stime dello stato attuale e previsioni dello stato futuro, a breve termine (tipicamente, per l'ora successiva).

Per sfruttare al meglio l'interazione con la rete densa di sensori, il modello deve avere un'elevata risoluzione spaziale, requisito che impone un'altrettanta elevata risoluzione temporale, ed una buona capacità di riprodurre la dinamica delle interazioni veicolari lungo le arterie stradali.

L'uso di un modello dinamico del secondo ordine fornisce una soluzione continua del deflusso anche in condizioni di elevato condizionamento veicolare e consente di tenere in conto di numerosi fattori, tra cui le caratteristiche della strada e, in maniera aggregata, il comportamento anticipatorio di guida tenuto dai conducenti.

Nella ricerca sono state considerate due diverse tipologie di dati: dati rilevati da sensori fissi in grado di rilevare la totalità del flusso veicolare in sezioni date e dati rilevati da sensori mobili lungo la rete stradale, costituiti da un campione di veicoli sonda. Entrambe le tipologie sono utili e, in particolare, l'uso di veicoli sonda è utile se integrato da dati rilevati da sensori fissi, necessari per stimare il tasso di campionamento ed effettuare le indispensabili operazioni di correzione e bilanciamento dei flussi rilevati. Nel contempo, i veicoli sonda forniscono importanti informazioni su archi privi di dispositivi di monitoraggio, che di norma sono la maggior parte della rete.

Nell'applicazione al caso di studio del GRA di Roma, è stato possibile verificare come il modello di traffico possa descrivere in maniera estremamente dettagliata e sufficientemente accurata la dinamica del deflusso sfruttando sia i dati di veicoli sonda che quelli provenienti dai sensori fissi; è pertanto confermata la convenienza tecnica, nell'operare in tempo reale a partire dai dati rilevati da una rete diffusa di sensori di traffico posizionati sui pali per l'illuminazione stradale o sugli impianti semaforici.

Dai risultati ottenuti si deduce che il modello è in grado di riprodurre la dinamica del traffico osservata in condizioni anche molto diverse tra loro. In particolare, si è riscontrata la capacità di riprodurre con buona approssimazione anche la condizione più anomala di congestione rilevata nel corso del mese di maggio 2010.

Quando il modello è utilizzato come strumento previsionale on-line e real-time, la corretta inizializzazione delle variabili di stato acquista un'importanza addirittura cruciale. In tal caso è necessario stimare in maniera adeguata le variabili di ingresso del sistema. Per ottenere buoni risultati dalla simulazione previsionale occorre verificare tanto l'inizializzazione delle variabili di ingresso all'inizio della simulazione, che deve essere la più precisa possibile, quanto la stima dei valori futuri, che deve essere accurata e coerente con il successivo verificarsi nella realtà.

La validazione della previsioni non ha fornito risultati altrettanto buoni della validazione in calibrazione e ciò va imputato appunto alla difficoltà di ottenere una stima affidabile dei dati di entrata ed uscita dalle rampe, dove, in mancanza di un sistema di monitoraggio fisso, gli errori del campionamento con veicoli sonda si moltiplicano sia perché in corrispondenza del passaggio dal sistema autostradale alla rete ordinaria cambiano le modalità di monitoraggio, sia perché su archi corti come le rampe il tasso di campionamento di veicoli sonda, effettuato ad intervalli regolari di percorrenze, diventa estremamente basso.

7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Greenberg, H. (1959). An Analysis of Traffic Flow. *Operations Research*, Vol 7, pp. 78-85.
- [2] Greenshields, B. D. (1935). A Study in Highway Capacity. *Highway Research Board*, Proceedings, Vol.14, p. 458.
- [3] Lighthill, M. J. and G. B. Whitham, (1955). *On Kinematic Waves: II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads*. Proceedings of the Royal Society: A229, pp. 317-347, London.
- [4] Prigogine, I. and R. Herman (1971). *Kinetic Theory of Vehicular Traffic*. Am. Elsevier Publ. New York.
- [5] Payne, H. J. (1979). FREFLO: A Macroscopic Simulation Model of Freeway Traffic. *Transportation Research Record*, Vol.722, pp. 68-77.
- [6] Papageorgiou, M., J. M. Blosseville, and H. Hadj-Salem (1990). Modelling and Real-Time Control of Traffic Flow on the Southern Part of the Boulevard Peripherique in Paris Part I: Modelling, Part II: Coordinated Ramp Metering. *Transportation Research A*, 24A, pp. 345-370.
- [7] Castillo, J. M., P. Pintado, and F. G. Benitez (1993). A Formulation for the Reaction Time of Traffic Flow Models. In C. Daganzo (ed). *Theory of Transportation and Traffic Flow*. Elsevier Science.
- [8] Daganzo C. (1995). Requiem for Second-Order Fluid Approximations of Traffic Flow. *Transportation Research-B*, Vol.29B, No.4, pp. 277-286.
- [9] Papageorgiou M. (1998) Some remarks on macroscopic traffic flow modelling *Transpn Res.-A*, Vol. 32, No. 5, pp. 323±329. Elsevier Science.
- [10] T. Bellemans, B. De Schutter, and B. De Moor (2002) Models for traffic control,” *Journal A*, vol. 43, no. 3–4, pp. 13–22, 2002.
- [11] Messmer, A., Papageorgiou, M.(1990) METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks. *Traffic Engineering & Control* 31, No. 8/9, pp. 466 - 470; No. 10, p. 549.
- [12] Hoogendoorn, S.P. and P. H. Bovy (2001) State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, volume 215(1). pp. 283–303.
- [13] Chowdhury et al. D. (2000) Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. *Institut fur Theoretische Physik, Universitat zu Koln, D-50923 Koln, Germany Physics Reports* 329, pp. 199-329