

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura

Dottorato di ricerca in

“Valutazione e Mitigazione dei Rischi Urbani e Territoriali” - XXIX Ciclo  
Curriculum: Ingegneria delle infrastrutture idrauliche, sanitario ambientali e dei trasporti

*Tesi di dottorato di ricerca*

**MONITORAGGIO, STIMA E PREVISIONE REAL-TIME  
DEL TRAFFICO VEICOLARE CON TECNOLOGIE ITS.  
IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA SPERIMENTATO  
NELL'AREA URBANA DI CATANIA**

*Dottoranda:*

Vincenza Torrisi

*Coordinatore:*

Prof. Ing. Massimo Cuomo

*Tutor:*

Prof. Ing. Matteo Ignaccolo

*Supervisori:*

Prof. Ing. Giuseppe Inturri

Prof. Ing. Guido Gentile







# Sommario

It is well known that given the continued growth of urban areas and the consequential increase in demand for mobility in towns and cities, traffic congestion will become an increasingly serious issue unless the transport systems undergo considerable structural change.

Innovative transport systems, better mobility planning and smart urban transport solutions might promote a more sustainable mobility. In this way, most advanced cities and national governments are increasingly viewing Intelligent Transport Systems (ITS) as the solution for designing intelligent transport networks and an efficient action for a sustainable growth.

Starting from these remarks, the primary objective of the present research work concerns the development of a methodological approach to implement a traffic control and supervisor system and related infomobility services.

First of all, the main focus of this study is the design and development (installation, implementation and calibration) of a traffic monitoring, estimating and short-term forecasting system, through the integration of real-time traffic data in a dynamic simulation model. The proposed methodology allows the identification of the conceptual model that represents the basis of the system's architecture, in order to define a set of required services, functional relationships and specific characteristics identified from the stakeholders needs, which will be involved by this system.

According to the features that wireless sensor networks have no space constraints, flexible distribution, mobile convenience and quick reaction, a scheme is presented, which uses wireless sensor networks to monitor city traffic flows and it is designed a traffic monitoring system based on radar sensor network, that is applicable to many types of city environment.

As far as the traffic flow estimating and forecasting method, it is based on the integration of a dynamic assignment simulation model and the application of periodic update with movable horizon called rolling horizon. This allows to reproduce the dynamic interaction between the level of congestion and users route choices of a congested road network, that is significant non-linear. In particular, it propagates the spatial and temporal traffic flow measured in less than 1% of the network links and reaching a high level of precision in short

term traffic predictions over the whole graph. With this system, it is possible to monitor important roads that are easily blocked and find out the time changing law of traffic congestion, and then put the focus on monitoring them in order to greatly reduce the investment and achieve high efficiency.

The described methodology is applied to the urban area of Catania (Italy) through the implementation of a traffic monitoring, estimation and forecasting system, equipped with radar sensor and a central control station for traffic data elaborations.

The architecture of the implemented system consisting of three levels: a peripheral and a central level, connected by a communication level. The peripheral level is made up of 29 radar sensors for traffic detection, which are located along a cordon surrounding the urban area of Catania, and of 2 Variable Message Signs (VMS) for users' information. In addition, there are also available Floating Car Data (FCD) in the amount of about 1000 probe vehicles in the study area. The communication level is constituted by a GPRS cellular network that allows to wireless connect the peripheral level to the central system and enables the transmission of collected data – flow, occupancy, average speed and vehicle classification – each 5 minutes, with a high accuracy. The central level consists of two software: a software for monitoring and managing the peripheral devices, and a software system for monitoring traffic in real-time and forecasting its short-term. It supplies traffic data including flow, speed, density and queue from simulations integrating the available radar detectors' data and FCD. Therefore, this system is able to provide real time information on traffic congestion on the main streets of Catania, with 15 minutes' time intervals. Although this information is useful for just-in-time delivery operation, or for private cars movements inside the city, in order to provide a description of how congestion evolves, on each arc of the road network, during the day.

This architecture is further enhanced by the presence of two additional modules: a dynamic intermodal and multimodal journey planner and an environmental module. The journey planner is able to determine the optimal path, taking into account real-time and future conditions of the network, by using different transport modes (foot, bicycle, public transport, possibly combined with private vehicle). The environmental module is based on COPERT4 model and it allows the calculation of vehicular emissions, starting from the value of estimated traffic flows.

The complex set-up of this system comprises the following phases: definition of the study area with the characterisation of its network graph and the modelling of demand segments; identification of the traffic sensors locations and subsequent installation; integration of FCD in the data model; implementation, configuration and calibration of the central system; implementation of the additional modules.

From a holistic viewpoint, such a system deployment can be considered a key to maximizing efficiency in traffic management through the lightening of congestion and

consequent shortening of travel durations. Furthermore, environmentally speaking, it induces traffic efficiency and fluidity to grow, resulting in reductions in CO<sub>2</sub> emission and other air-borne pollutants.

By using obtained data from the implemented simulation model, two further methodologies are presented in this thesis. The first methodology is based on the development of a detailed statistical analysis procedure for reliability assessment of data coming from traffic monitoring systems and simulation models. The second methodology develops a statistical approach for capturing the variability of travel time reliability (TTR) in an extended traffic network, incorporating travel time analysis in order to evaluate their variation and to define the workability of the transport network.

In more detail, with the first methodology it is carried out a statistical analysis of traffic data to verify the reliability of reliefs and estimations respectively obtained by the traffic sensors and the simulation model. Provided analysis are performed on multiple sections of the urban network with a high level of detail (each 5 minutes and for different vehicle classes).

The second one proposes an approach for estimating TTR of a large urban network at different aggregation level, by using the historical radar detector data and the real-time traffic simulation model, incorporating the analysis and the comparison of various TTR measures. The basic variables used are travel times and traffic flows of each link which belongs to the analysed traffic network. The statistical measures used to quantify TTR are Standard Deviation, Travel Time Window, Buffer Index, Planning Time and Buffer Time. Model is calibrated and tested for different network's sizes at various aggregation levels. The 15-min travel times and traffic flows data were simulated for the last and this year, including weekends and holidays, and they were aggregated in a time interval of one hour. The results deriving from the comparison of different paths, shows in some cases that routes with higher values of average travel time presents best results as regards travel time reliability. This assessment is synthetized into recommendations for implementing travel time reliability in an extended transport network.

To conclude, the final aim of this work is to increase the knowledge of the actual dynamic of road traffic in urban areas, to monitor the reliability of the transport system and to obtain useful data and information that can contribute to the implementation of an optimal control of mobility system, through a more efficient and integrated use of the road infrastructure and the available devices on it.





# Indice

<b>SOMMARIO .....</b>	<b>III</b>
<b>INDICE .....</b>	<b>1</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE.....</b>	<b>7</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE.....</b>	<b>13</b>
<b>PREMESSA .....</b>	<b>15</b>
<b>CAPITOLO 1 INTRODUZIONE .....</b>	<b>17</b>
1.1 L'EVOLUZIONE DEI TRASPORTI: LA CRESCITA DELLA DOMANDA DI MOBILITÀ MOTORIZZATA....	17
1.2 I COSTI ESTERNI DELLA MOBILITÀ .....	20
1.2.1 <i>L'inquinamento atmosferico</i> .....	21
1.2.1.1 <i>Effetti dell'inquinamento sull'uomo</i> .....	23
1.2.1.2 <i>Legislazione italiana in merito all'inquinamento atmosferico</i> .....	24
1.2.2 <i>Il cambiamento climatico</i> .....	27
1.2.3 <i>L'inquinamento acustico</i> .....	29
1.2.4 <i>La congestione</i> .....	29
1.2.5 <i>L'incidentalità</i> .....	30
1.2.6 <i>L'intrusione visiva e il consumo di suolo</i> .....	31
1.3 STRATEGIE DI MITIGAZIONE: I SISTEMI DI TRASPORTO INTELLIGENTI .....	31
1.3.1 <i>Definizione di ITS</i> .....	32
1.3.2 <i>Il ruolo della telematica nel sistema di trasporto</i> .....	34
1.3.3 <i>Benefici apportati dagli ITS</i> .....	35
<b>CAPITOLO 2 TECNOLOGIE ITS PER MIGLIORARE LA MOBILITA'.....</b>	<b>38</b>
2.1 ARCHITETTURA FUNZIONALE DI UN SISTEMA ITS.....	38
2.2 CLASSIFICAZIONE DEI CAMPI APPLICATIVI DEGLI ITS .....	40
2.2.1 <i>Trasporto persone</i> .....	41

---

2.2.2	<i>Trasporto merci</i> .....	43
2.3	SISTEMI INFRASTRUCTURE-BASED E SISTEMI VEHICLE-BASED .....	44
2.3.1	<i>Sistemi infrastructure-based</i> .....	44
2.3.2	<i>Sistemi vehicle-based</i> .....	48
2.4	ESEMPI DI APPLICAZIONI DEI SISTEMI ITS NEL TRASPORTO PUBBLICO E PRIVATO.....	49
2.4.1	<i>Sistemi per la navigazione e l'informazione in viaggio</i> .....	50
2.4.2	<i>Sistemi per la gestione e il controllo del traffico</i> .....	52
2.4.3	<i>Sistemi per la gestione flotte di veicoli di trasporto pubblico</i> .....	53
2.4.4	<i>Sistemi per influenzare il comportamento dei viaggiatori</i> .....	55
2.4.5	<i>Sistemi per la gestione degli accessi e della domanda</i> .....	56
2.4.6	<i>Sistemi per la gestione di flotte e merci e della logistica</i> .....	56
2.4.7	<i>Enforcement</i> .....	57
2.5	PRINCIPALI BEST PRACTICES NEL PANORAMA NAZIONALE .....	57
2.5.1	<i>La centrale della mobilità di Torino</i> .....	58
2.5.2	<i>Il Sistema integrato di gestione del traffico di Roma</i> .....	60
2.5.3	<i>Il Sistema Safety Tutor in Italia</i> .....	62
2.6	RIFERIMENTI NORMATIVI E PIANO D'AZIONE DEI SISTEMI ITS .....	64
 <b>CAPITOLO 3 LA SIMULAZIONE DEI SISTEMI DI TRASPORTO E LORO INTERAZIONI</b> .....		<b>66</b>
3.1	MODELLI PER LA SIMULAZIONE DEI SISTEMI DI TRASPORTO .....	66
3.1.1	<i>Identificazione del sistema di trasporto</i> .....	68
3.1.2	<i>I modelli macroscopici</i> .....	69
3.1.2.1	<i>Modellazione dell'offerta</i> .....	71
3.1.2.2	<i>Modellazione della domanda</i> .....	72
3.1.2.3	<i>Interazione domanda-offerta</i> .....	73
3.2	MODELLI DI DIAGNOSI E PREVISIONE DEL TRAFFICO .....	75
3.2.1	<i>I metodi statistici di analisi dei dati</i> .....	77
3.2.2	<i>I metodi di simulazione del traffico</i> .....	78
3.2.2.1	<i>Modello di assegnazione dinamica</i> .....	79
3.3	MODELLI DI EMISSIONE VEICOLARE.....	82
3.3.1	<i>I modelli dinamici di emissione</i> .....	85
3.3.2	<i>I modelli statici di emissione</i> .....	87
3.3.3	<i>La metodologia COPERT</i> .....	89
3.3.3.1	<i>Calcolo dei fattori di emissione</i> .....	91
3.3.3.2	<i>Calcolo delle emissioni</i> .....	92
 <b>CAPITOLO 4 METODOLOGIA</b> .....		<b>95</b>

---

---

4.1 SVILUPPO DELL'ARCHITETTURA DEL SISTEMA ITS.....	95
4.1.1 Modello concettuale.....	96
4.1.2 Architettura logico-funzionale.....	98
4.1.3 Architettura fisica.....	100
4.1.4 Architettura di comunicazione.....	103
4.1.5 Architettura organizzativa.....	105
4.2 STRUTTURA DEI SISTEMI DI MONITORAGGIO E MISURE DI TRAFFICO.....	106
4.2.1 Conteggio veicolare automatico.....	106
4.2.2 Rilievo con sensori FCD.....	109
4.3 STIMA E PREVISIONE DEL TRAFFICO IN REAL-TIME.....	110
4.3.1 Procedura di assegnazione dinamica e tecnica di "Rolling horizon".....	112
4.3.2 La piattaforma di simulazione: OPTIMA.....	114
4.3.2.1 TMB – Transportation Model Builder.....	117
4.3.2.2 DUE – Dynamic User Equilibrium.....	118
4.3.2.3 Vehicle Tracker.....	118
4.3.2.4 SDNL – Sequential Dynamic Network Loading.....	119
4.3.3 Calibrazione sperimentale del modello.....	120
4.4 ANALISI STATISTICA DEI DATI DI TRAFFICO.....	120
4.4.1 Analisi dei dati rilevati da monitoraggio automatico.....	121
4.4.2 Analisi dei dati stimati dal modello.....	124
4.5 MISURA DELL'AFFIDABILITÀ DEL SISTEMA DI TRASPORTO.....	125
4.5.1 Analisi statistica.....	125
4.5.2 Variabili di rete e livelli di analisi.....	128
<b>CAPITOLO 5 CASO STUDIO.....</b>	<b>130</b>
5.1 QUADRO TERRITORIALE E SCELTA DEL CASO STUDIO.....	130
5.2 IL SISTEMA DI SUPERVISIONE DEL TRAFFICO E SERVIZI DI INFOMOBILITÀ DI CATANIA.....	132
5.3 DESCRIZIONE FUNZIONALE ED ARCHITETTURA DEL SISTEMA ITS.....	134
5.3.1 Unità di rilevamento e controllo MobilTraf300.....	136
5.3.2 Applicativo MobilTraf MANAGER.....	138
5.3.3 Sistema di informazione all'utenza – PMV Falcon 03.....	142
5.3.4 Centrale operativa di controllo.....	142
5.3.4.1 MMobility.....	143
5.3.4.2 Optima – Optimal Path Travel Information for Mobility Actions.....	146
5.4 FORNITURA ED INSTALLAZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO.....	149
5.4.1 Individuazione dell'area di studio.....	151
5.4.2 Identificazione delle sezioni di posizionamento dei sensori.....	153

---

---

5.4.3	<i>Installazione e configurazione dei sensori MT300</i>	156
5.5	<b>IMPLEMENTAZIONE E CALIBRAZIONE DEL SISTEMA CENTRALE</b>	159
5.5.1	<i>Pre-calibrazione del modello di trasporto (off-line)</i>	160
5.5.1.1	<i>Modellazione dell'offerta di trasporto</i>	161
5.5.1.2	<i>Ricostruzione della domanda di trasporto privato</i>	167
5.5.2	<i>Calibrazione del sistema</i>	168
5.5.2.1	<i>Raccolta dei dati in campo e calibrazione del modello Optima</i>	169
5.5.2.2	<i>Fase di test e validazione del modello Optima</i>	170
5.5.2.3	<i>Fase di test e validazione del sincronismo tra MMobility e Optima</i>	171
5.5.3	<i>Integrazione dati FCD</i>	171
5.6	<b>SUPERVISIONE DEL TRAFFICO E INFORMAZIONE DINAMICA</b>	172
5.6.1	<i>Interfaccia operatore – Traffic Supervisor</i>	173
5.6.2	<i>Interfaccia utente - Traffic Portal</i>	176
5.7	<b>SERVIZI DI ROUTING E INFOMOBILITÀ</b>	177
5.7.1	<i>Pannelli a Messaggio Variabile</i>	178
5.7.2	<i>Implementazione del cerca-percorso dinamico Hyperpath</i>	179
5.8	<b>IMPLEMENTAZIONE E CONFIGURAZIONE DEL MODULO AMBIENTALE HABITAT</b>	182
5.9	<b>VALUTAZIONE DEI FLUSSI DI TRAFFICO RILEVATI E STIMATI</b>	183
5.9.1	<i>Analisi dei flussi per le sezioni dotate di rilevatore</i>	183
5.9.2	<i>Analisi dei flussi stimati dal modello</i>	211
5.10	<b>DETERMINAZIONE DELL’AFFIDABILITÀ DEI TEMPI DI VIAGGIO</b>	225
5.10.1	<i>Livello 1: Analisi globale di rete</i>	226
5.10.2	<i>Livello 2: Analisi di percorso</i>	231
5.10.3	<i>Livello 3: Analisi di arco</i>	236
<b>CAPITOLO 6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI</b>		<b>242</b>
<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b>		<b>249</b>
<b>APPENDICE A LOCALIZZAZIONE DELLE SEZIONI DI POSIZIONAMENTO DEI SENSORI</b>		<b>256</b>
A.1	<i>SEZIONE 1 – VIALE PRESIDENTE KENNEDY</i>	256
A.2	<i>SEZIONE 2 – ASSE DEI SERVIZI – STRADA PROVINCIALE 701</i>	257
A.3	<i>SEZIONE 3 – STRADA STATALE 192</i>	257
A.4	<i>SEZIONE 4 – A19 PALERMO-CATANIA</i>	258
A.5	<i>SEZIONE 5 – VIA PALERMO</i>	258
A.6	<i>SEZIONE 6 – SUPERSTRADA CATANIA-PATERNÒ</i>	259
A.7	<i>SEZIONE 7 – VIALE LORENZO BOLANO - CIRCONVALLAZIONE</i>	259

---

---

A.8 SEZIONE 8 – VIA GALERMO.....	260
A.9 SEZIONE 9 – VIA SANTA SOFIA.....	260
A.10 SEZIONE 10 – VIA PASSO GRAVINA.....	261
A.11 SEZIONE 11 – VIA LEUCATIA.....	261
A.12 SEZIONE 12A-12B – VIALE MEDITERRANEO .....	262
A.13 SEZIONE13 – VIA NUOVALUCELLO .....	263
A.14 SEZIONE 14 – VIALE GIUSEPPE LAINÒ-VIALE ENZO LONGO .....	263
A.15 SEZIONE 15 – VIA MESSINA.....	264
A.16 SEZIONE 16 – VIA ACICASTELLO.....	264
A.17 SEZIONE 17 – VIALE AFRICA-SS114.....	265
A.18 SEZIONE 18 – VIA A. FLEMING.....	265
A.19 SEZIONE 19A-19B – VIALE RUGGERO DI LAURIA.....	266

## **APPENDICE B RISULTATI DELLA VALUTAZIONE DEI FLUSSI DI TRAFFICO**

### **RILEVATI E STIMATI.....267**

B.1 ANALISI SENSORE MT14B .....	267
<i>B.1.1 Sensore MT14b – lunedì 11/05/2015 – 8:00-9:00.....</i>	<i>267</i>
<i>B.1.2 Sensore MT14b – lunedì 11/05/2015 – 13:00-14:00 .....</i>	<i>269</i>
<i>B.1.3 Sensore MT14b – lunedì 11/05/2015 – 19:00-20:00 .....</i>	<i>271</i>
<i>B.1.4 Sensore MT14b – giovedì 14/05/2015 – 8:00-9:00.....</i>	<i>272</i>
<i>B.1.5 Sensore MT14b – giovedì 14/05/2015 – 13:00-14:00.....</i>	<i>274</i>
<i>B.1.6 Sensore MT14b – giovedì 14/05/2015 – 19:00-20:00.....</i>	<i>276</i>
<i>B.1.7 Sensore MT14b – lunedì 18/05/2015 – 8:00-9:00 .....</i>	<i>277</i>
<i>B.1.8 Sensore MT14b – lunedì 18/05/2015 – 13:00-14:00 .....</i>	<i>279</i>
<i>B.1.9 Sensore MT14b – lunedì 18/05/2015 – 19:00-20:00.....</i>	<i>281</i>
<i>B.1.10 Sensore MT14b – giovedì 21/05/2015 – 8:00-9:00.....</i>	<i>282</i>
<i>B.1.11 Sensore MT14b – giovedì 21/05/2015 – 13:00-14:00 .....</i>	<i>284</i>
<i>B.1.12 Sensore MT14b – giovedì 21/05/2015 – 19:00-20:00 .....</i>	<i>286</i>
B.2 ANALISI SEZIONE MOD11 – ARCO 2.....	288
<i>B.2.1 Sensore MOD11, Arco 1 – giovedì 04/06/2015 – 8:00-9:00, 13:00-14:00, 19:00-20:00 .....</i>	<i>288</i>
<i>B.2.2 Sensore MOD11, Arco 1 – lunedì 08/06/2015 – 8:00-9:00, 13:00-14:00, 19:00-20:00 .....</i>	<i>290</i>

## **APPENDICE C RISULTATI DELLA DETERMINAZIONE DELL’AFFIDABILITÀ**

### **DEI TEMPI DI VIAGGIO.....294**

C.1 ANALISI INTRA-GIORNALIERA – 18/06/2016 .....	294
C.2 ANALISI INTRA-GIORNALIERA – 19/06/2016.....	296

---

C.3 ANALISI INTRA-GIORNALIERA – 20/06/2016.....	297
C.4 ANALISI INTRA-GIORNALIERA – 23/06/2016.....	298
C.5 ANALISI INTRA-GIORNALIERA – 25/06/2016.....	300
C.6 ANALISI INTRA-GIORNALIERA – 26/06/2016.....	301
C.7 ANALISI INTRA-GIORNALIERA – 27/06/2016.....	302

---

## Indice delle figure

Figura 1.1 Veicoli circolanti in Italia- Anni dal 1899 al 2010	18
Figura 1.2 Ripartizione modale passeggeri-km - Anno 2014	18
Figura 1.3 Ripartizione modale nelle città con più di 250 mila abitanti	19
Figura 1.4 Tasso di motorizzazione auto (autovetture per 1000 abitanti)	19
Figura 1.5 Schema del processo di inquinamento atmosferico	22
Figura 1.6 Trend delle emissioni di GHG per differenti settori	28
Figura 1.7 Trend delle emissioni di GHG per modo di trasporto	28
Figura 1.8 Incidenti stradali con lesioni a persone, morti e feriti – Anni 2001-2013	30
Figura 1.9 Interazioni nei sistemi ITS	33
Figura 1.10 La telematica applicata al sistema dei trasporti	34
Figura 1.11 Il ruolo degli ITS nell’ambito del sistema domanda offerta di trasporto e delle loro interazioni con l’energia e l’ambiente esterno	35
Figura 2.1 Interazioni tra le diverse componenti del sistema ITS	39
Figura 2.2 Criteri di classificazione dei campi applicativi degli ITS	42
Figura 2.3 La centrale di mobilità integrata di Torino	58
Figura 2.4 Sistema 5T – Gestione integrata della mobilità	59
Figura 2.5 Sistema 5T – Servizi di infomobilità	60
Figura 2.6 Schematizzazione del funzionamento del <i>Sistema Tutor</i>	63
Figura 2.7 Rete autostradale italiana dove è attivo il <i>Sistema Tutor</i>	63
Figura 3.1 Interazione tra i modelli macroscopici	70
Figura 3.2 Rappresentazione dell’offerta mediante un grafo di rete	71
Figura 3.3 Struttura del modello a quattro stadi	73
Figura 3.4 Ruolo degli ITS in un sistema di stima e previsione del traffico real-time	76
Figura 3.5 Schema del modello di DTA e relativo algoritmo	81
Figura 3.6 Descrizione analitica del processo di emissione	83
Figura 3.7 Schema di un modello dinamico di emissione	87
Figura 4.1 Schema semplificato di un diagramma di contesto	97
Figura 4.2 Diagramma di contesto del Sistema ITS	97
Figura 4.3 Relazione Traffico – Sistema ITS	97
Figura 4.4 Modello semplificato di architettura logico/funzionale	98

---

Figura 4.5 Architettura logico-funzionale del Sistema ITS	100
Figura 4.6 Modello semplificato di architettura fisica	101
Figura 4.7 Architettura fisica del Sistema ITS	103
Figura 4.8 Architettura di comunicazione del Sistema ITS	104
Figura 4.9 Nomenclatura delle interfacce del Sistema ITS	104
Figura 4.10 Macroprocesso del Sistema ITS	105
Figura 4.11 Schematizzazione del sistema di monitoraggio e controllo	110
Figura 4.12 Struttura del modello di assegnazione dinamica	112
Figura 4.13 Approccio “Rolling horizon”	113
Figura 4.14 Grafo completo e grafo di assegnazione	114
Figura 4.15 Schematizzazione funzionale di OPTIMA	115
Figura 5.1 Livelli del sistema ITS di Catania	132
Figura 5.2 Schema delle fasi di funzionamento del sistema ITS di Catania	133
Figura 5.3 Architettura del sistema ITS di Catania	135
Figura 5.4 Vista frontale MobilTraf300 versione “compact”	137
Figura 5.5 Vista posteriore MobilTraf300 versione “compact”	137
Figura 5.6 Videata della sezione “Stato	139
Figura 5.7 Videata della sezione “Proprietà”	140
Figura 5.8 Finestra per la visualizzazione dei dati in tempo reale	141
Figura 5.9 Finestra per la visualizzazione dei file di log	141
Figura 5.10 Sistema di informazione all’utenza <i>Falcon 03</i>	142
Figura 5.11 Schermata principale di <i>MMobility</i>	144
Figura 5.12 Esempio di report – Distribuzione dei veicoli	146
Figura 5.13 Moduli principali per la procedura di previsione del traffico	147
Figura 5.14 Parte off-line e parte on-line di OPTIMA	148
Figura 5.15 Tavola del quaderno delle sezioni di posizionamento dei sensori	150
Figura 5.16 Delimitazione dell’area di studio	151
Figura 5.17 Grafo di rete dell’area di studio	153
Figura 5.18 Localizzazione delle sezioni di posizionamento dei sensori	155
Figura 5.19 Schema tecnico di installazione su palo dell’illuminazione	157
Figura 5.20 Plinto di fondazione e palo di supporto al rilevatore e al pannello	158
Figura 5.21 Postazione di monitoraggio realizzata sul campo – sezione 18	158
Figura 5.22 Struttura anti-cesura	159
Figura 5.23 Descrizione del modello di VISUM	160
Figura 5.24 Modello di rete della città di Catania	161
Figura 5.25 Grafo utilizzato per il Piano Generale del Traffico Urbano – PGTU	162
Figura 5.26 Elenco (estratto) degli archi costituenti il grafo di Catania	162
Figura 5.27 Elenco (estratto) dei nodi del grafo di Catania	163



---

Figura 5.28 Elenco (estratto) delle zone del grafo di Catania	163
Figura 5.29 Elenco (estratto) dei connettori del grafo di Catania	164
Figura 5.30 Secondary Network e Assignment Network del grafo di Catania	164
Figura 5.31 Finestra di dialogo della funzione <i>Edit Graphic Parameters</i>	166
Figura 5.32 Mappa cromatica in funzione del numero di corsie per ciascun arco	166
Figura 5.33 Segmenti di domanda del modello di Catania	167
Figura 5.34 Finestra di dialogo della funzione <i>Modifica Serie temporale</i>	168
Figura 5.35 Correlazione lineare tra flussi rilevati e stimati dopo la TFlowfuzzy	169
Figura 5.36 Steps Transportation Model Building – TBM	170
Figura 5.37 Transportation Data Exchange Viewer – TDE	170
Figura 5.38 Flow chart count location	171
Figura 5.39 TrafficSupervisor: Visualizzazione dello stato di traffico sulla rete	174
Figura 5.40 TrafficSupervisor: Monitoraggio real-time dei flussi di traffico	175
Figura 5.41 TrafficSupervisor: Inserimento di eventi di traffico (incidente) con monitoraggio e previsione degli effetti	175
Figura 5.42 Traffic Portal: Visualizzazione delle condizioni correnti di deflusso	176
Figura 5.43 Traffic Portal: Segnalazione della presenza di lavori di manutenzione	176
Figura 5.44 Informazione sullo stato del traffico esposta su PMV	178
Figura 5.45 Interfaccia grafica del cerca-percorso Hyperpath	180
Figura 5.46 Sincronismo tra OPTIMA e il servizio di routing di Hyperpath	181
Figura 5.47 Variazione di percorso in seguito ad un evento anomalo nella rete	182
Figura 5.48 Esempio di compilazione della scheda di rilievo	185
Figura 5.49 Localizzazione sezione 8 – Viale Giuseppe Lainò - Viale Enzo Longo	186
Figura 5.50 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min. –MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00	187
Figura 5.51 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.–MT14a –11/05/2015, 8:00-9:00	188
Figura 5.52 Veicoli totali rilevati nei 5 min. –MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00	188
Figura 5.53 Fenomeno di oscuramento totale	189
Figura 5.54 Fenomeno di oscuramento parziale	189
Figura 5.55 Analisi di affidabilità veicoli leggeri – MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00	189
Figura 5.56 Analisi di affidabilità veicoli pesanti –MT14a– 11/05/2015, 8:00-9:00	190
Figura 5.57 Analisi di affidabilità veicoli totali – MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00	190
Figura 5.58 Interpolazione lineare e $R^2$ veicoli leggeri,MT14a, 11/05/15,8:00-9:00	191
Figura 5.59 Interpolazione lineare e $R^2$ veicoli pesanti,MT14a,11/05/15,8:00-9:00	192
Figura 5.60 Interpolazione lineare e $R^2$ veicoli totali,MT14a,11/05/15,8:00-9:00	192
Figura 5.61 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14a-11/05/2015, 13:00-14:00	192
Figura 5.62 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min-MT14a-11/05/2015, 13:00-14:00	193
Figura 5.63 Veicoli totali rilevati nei 5 min.–MT14a-11/05/2015, 13:00-14:00	193
Figura 5.64 Analisi di affidabilità– MT14a-11/05/2015, 13:00-14:00	193

---

---

Figura 5.65 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min.-MT14a-11/05/2015, 19:00-20:00	194
Figura 5.66 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.-MT14a-11/05/2015,19:00-20:00	194
Figura 5.67 Veicoli totali rilevati nei 5 min.-MT14a-11/05/2015, 19:00-20:00	195
Figura 5.68 Analisi di affidabilità– MT14a-11/05/2015, 19:00-20:00	195
Figura 5.69 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min.-MT14a-14/05/2015, 8:00-9:00	196
Figura 5.70 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min- MT14a-14/05/2015, 8:00-9:00	196
Figura 5.71 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-14/05/2015, 8:00-9:00	196
Figura 5.72 Analisi di affidabilità– MT14a-14/05/2015, 8:00-9:00	197
Figura 5.73 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min.-MT14a-14/05/2015, 13:00-14:00	197
Figura 5.74 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.-MT14a-14/05/2015,13:00-14:00	198
Figura 5.75 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-14/05/2015, 13:00-14:00	198
Figura 5.76 Analisi di affidabilità– MT14a-14/05/2015, 13:00-14:00	198
Figura 5.77 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min.-MT14a-14/05/2015,19:00-20:00	199
Figura 5.78 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-14/05/2015,19:00-20:00	199
Figura 5.79 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-14/05/2015, 19:00-20:00	200
Figura 5.80 Analisi di affidabilità– MT14a-14/05/2015, 19:00-20:00	200
Figura 5.81 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min.-MT14a-18/05/2015, 8:00-9:00	201
Figura 5.82 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-18/05/2015, 8:00-9:00	201
Figura 5.83 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-18/05/2015, 8:00-9:00	201
Figura 5.84 Analisi di affidabilità– MT14a-18/05/2015, 8:00-9:00	202
Figura 5.85 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min.-MT14a-18/05/2015,13:00-14:00	202
Figura 5.86 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-18/05/2015, 13:00-14:00	203
Figura 5.87 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-18/05/2015, 13:00-14:00	203
Figura 5.88 Analisi di affidabilità– MT14a-18/05/2015, 13:00-14:00	203
Figura 5.89 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min.-MT14a-18/05/2015,19:00-20:00	204
Figura 5.90 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-18/05/2015,19:00-20:00	204
Figura 5.91 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-18/05/2015, 19:00-20:00	205
Figura 5.92 Analisi di affidabilità– MT14a-18/05/2015, 19:00-20:00	205
Figura 5.93 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min.-MT14a-21/05/2015,8:00-9:00	206
Figura 5.94 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-21/05/2015, 8:00-9:00	206
Figura 5.95 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-21/05/2015, 8:00-9:00	206
Figura 5.96 Analisi di affidabilità– MT14a-21/05/2015, 8:00-9:00	207
Figura 5.97 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min.-MT14a-21/05/2015,13:00-14:00	207
Figura 5.98 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-21/05/2015, 13:00-14:00	208
Figura 5.99 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-21/05/2015, 13:00-14:00	208
Figura 5.100 Analisi di affidabilità– MT14a-21/05/2015, 13:00-14:00	208
Figura 5.101 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min.-MT14a-21/05/2015,19:00-20:00	209
Figura 5.102 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-21/05/2015,19:00-20:00	209

---

Figura 5.103 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-21/05/2015, 19:00-20:00	210
Figura 5.104 Analisi di affidabilità- MT14a-21/05/2015, 19:00-20:00	210
Figura 5.105 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 1 – Via Francesco Fusco	212
Figura 5.106 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 2–Viale V. Veneto-C. Italia	212
Figura 5.107 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 3 – Parco Gioeni	213
Figura 5.108 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 5 – Via A. di Sangiuliano	213
Figura 5.109 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 6 – Via Carlo Forlanini	214
Figura 5.110 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 7 – Viale Mario Rapisardi	214
Figura 5.111 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 8 – Via Caronda	215
Figura 5.112 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 9 – Via Vincenzo Giuffrida	215
Figura 5.113 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 10–Via V. E. Orlando	216
Figura 5.114 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 11 – Viale Africa	216
Figura 5.115 Schema ID arco e ID nodo sezione MOD11 – Viale Africa	218
Figura 5.116 Andamento flusso veicolare – MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 8:00-9:00	219
Figura 5.117 Andamento flusso veicolare–MOD11, Arco 1–4/06/2015, 13:00-14:00	219
Figura 5.118 Andamento flusso veicolare–MOD11, Arco 1–4/06/2015, 19:00-20:00	219
Figura 5.119 Analisi di affidabilità dei flussi–MOD11, Arco 1–4/06/15, 8:00-9:00	220
Figura 5.120 Analisi di affidabilità dei flussi–MOD11, Arco 1–4/06/15, 13:00-14:00	220
Figura 5.121 Analisi di affidabilità dei flussi–MOD11, Arco 1–4/06/15, 19:00-20:00	220
Figura 5.122 Andamento flusso veicolare – MOD11, Arco 1 – 08/06/15, 8:00-9:00	222
Figura 5.123 Andamento flusso veicolare–MOD11, Arco 1–08/06/15, 13:00-14:00	223
Figura 5.124 Andamento flusso veicolare–MOD11, Arco 1–08/06/15, 19:00-20:00	223
Figura 5.125 Analisi di affidabilità dei flussi,MOD11, Arco 1,08/06/15, 8:00-9:00	223
Figura 5.126 Analisi di affidabilità dei flussi,MOD11, Arco 1,08/06/15,13:00-14:00	223
Figura 5.127 Analisi di affidabilità dei flussi,MOD11, Arco 1,08/06/15,19:00-20:00	224
Figura 5.128 Percezione delle condizioni di traffico da parte degli utenti	225
Figura 5.129 Livelli di analisi	226
Figura 5.130 Analisi globale di rete - 16/06/2016	228
Figura 5.131 Travel Time Window dei tempi medi orari di rete – 16/06/2016	229
Figura 5.132 Distribuzione gaussiana dei tempi medi orari di rete – 16/06/2016	230
Figura 5.133 Diagramma dell’analisi inter-giornaliera di rete – 16-27/06/2016	231
Figura 5.134 Mappa dei tre percorsi selezionati: Ognina (destra), Passo Gravina (sinistra) e Corso delle Province (centro)	232
Figura 5.135 Travel Time Window dei tempi medi orari, Ognina, 16/06/2016	233
Figura 5.136 Travel Time Window dei tempi medi orari, P.Gravina, 16/06/16	234
Figura 5.137 Travel Time Window dei tempi medi orari, C.Province, 16/06/16	234

---

---

Figura 5.138	Diagramma analisi inter-giornaliera, percorso Ognina, 16-27/06/16	235
Figura 5.139	Diagramma analisi inter-giornaliera, percorso P.Gravina, 16-27/06/16	236
Figura 5.140	Diagramma analisi inter-giornaliera, percorso C.Province, 16-27/06/16	236
Figura 5.141	Travel Time Window dei tempi medi orari, Arco C.Italia, 16/06/16	238
Figura 5.142	Travel Time Window dei tempi medi orari, Arco V.M.Polo, 16/06/16	238
Figura 5.143	Diagramma analisi inter-giornaliera, Arco C.Italia, 16-27/06/16	240
Figura 5.144	Diagramma analisi inter-giornaliera, Arco V.M.Polo, 16-27/06/16	240

---

## Indice delle tabelle

Tabella 5.1 Caratteristiche delle sezioni di posizionamento dei sensori	156
Tabella 5.2 Flusso veicolare sensore nei 5 min. – MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00	187
Tabella 5.3 Flusso veicolare campo nei 5 min. – MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00	187
Tabella 5.4 Coefficienti – MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00	191
Tabella 5.5 Coefficienti – MT14a–11/05/2015, 13:00-14:00	194
Tabella 5.6 Coefficienti – MT14a–11/05/2015, 19:00-20:00	195
Tabella 5.7 Coefficienti – MT14a-14/05/2015, 8:00-9:00	197
Tabella 5.8 Coefficienti – MT14a-14/05/2015, 13:00-14:00	199
Tabella 5.9 Coefficienti – MT14a-14/05/2015, 19:00-20:00	200
Tabella 5.10 Coefficienti – MT14a-18/05/2015, 8:00-9:00	202
Tabella 5.11 Coefficienti – MT14a-18/05/2015, 13:00-14:00	204
Tabella 5.12 Coefficienti – MT14a-18/05/2015, 19:00-20:00	205
Tabella 5.13 Coefficienti – MT14a-21/05/2015, 8:00-9:00	207
Tabella 5.14 Coefficienti – MT14a-21/05/2015, 13:00-14:00	209
Tabella 5.15 Coefficienti – MT14a-21/05/2015, 19:00-20:00	210
Tabella 5.16 Flusso rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 8:00-9:00	218
Tabella 5.17 Flusso rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 13:00-14:00	218
Tabella 5.18 Flusso rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 19:00-20:00	219
Tabella 5.19 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 8:00-9:00	221
Tabella 5.20 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 13:00-14:00	221
Tabella 5.21 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 19:00-20:00	221
Tabella 5.22 Flusso rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 8:00-9:00	222
Tabella 5.23 Flusso rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 13:00-14:00	222
Tabella 5.24 Flusso rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 19:00-20:00	222
Tabella 5.25 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 8:00-9:00	224
Tabella 5.26 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 13:00-14:00	224
Tabella 5.27 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 19:00-20:00	224
Tabella 5.28 Tempi e flussi medi orari di rete – 16/06/2016	228
Tabella 5.29 Analisi inter-giornaliera di rete: Buffer Index, Planning Time Index e Buffer Time – 16-27/06/2016	231

---

Tabella 5.30 Tempi medi orari dei tre percorsi analizzati -16/06/2017	233
Tabella 5.31 Analisi inter-giornaliera di percorso: Tempo medio di percorrenza e Deviazione Standard– 16-27/06/2016	235
Tabella 5.32 Analisi inter-giornaliera di percorso: Buffer Index, Planning Time Index e Buffer Time – 16-27/06/2016	235
Tabella 5.33 Tempi medi orari dei tre percorsi analizzati -16/06/2017	237
Tabella 5.34 Analisi inter-giornaliera di arco: Tempo medio di percorrenza e Deviazione Standard– 16-27/06/2016	239
Tabella 5.35 Analisi inter-giornaliera di arco: Buffer Index, Planning Time Index e Buffer Time – 16-27/06/2016	239

---

## Premessa

L'Italia è uno dei Paesi Europei a più alta densità di traffico interno, con 902.497 milioni di passeggeri-km/anno. La modalità stradale, ancor più che nel trasporto merci, prevale sulle altre in maniera netta, con il 91,0% del traffico rilevato (Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2014-2015).

Questa accresciuta propensione alla mobilità ha determinato l'incremento del tasso di motorizzazione individuale, cioè un notevole aumento del numero di vetture in circolazione in una struttura urbana già prossima alla saturazione. Ciò comporta un incremento considerevole del grado di congestione e un altrettanto preoccupante incremento dei danni ambientali.

La mobilità delle persone e delle merci rappresenta, dunque, un problema critico per la nostra società. Secondo le previsioni questa domanda di spostamento, già notevolmente aumentata negli ultimi decenni, continuerà a crescere nei prossimi anni; pertanto sarà necessario continuare negli sforzi per mitigare le conseguenze negative per l'ambiente, migliorare la qualità della vita, la sicurezza del trasporto e incrementare l'intera economia del nostro Paese.

Come dimostrano le esperienze internazionali, per affrontare le sfide poste dall'aumento continuo della domanda di mobilità occorre affiancare all'approccio tradizionale – che prevede interventi sulle infrastrutture, sui veicoli e sulla domanda – un approccio più innovativo, nel quale informazione, gestione e controllo operano in sinergia migliorando la relazione tra domanda e offerta e ottimizzando l'uso dei diversi modi di trasporto, delle infrastrutture e dei veicoli. Infatti, la telematica applicata ai trasporti, attraverso l'integrazione delle tecnologie informatiche con quelle delle telecomunicazioni, contribuisce a sfruttare al meglio il potenziale delle infrastrutture, offrendo diverse possibilità tecniche per gestire e controllare in modo globale i flussi di traffico.

I Sistemi Intelligenti di Trasporto (ITS – Intelligent Transport Systems) svolgono un ruolo determinante in questo approccio strategico, attraverso la gestione "intelligente" dei processi della mobilità e dell'informazione che li accompagna, la quale rappresenta oggi un fattore chiave di espansione, di crescita economica e di miglioramento dei servizi della società in cui viviamo.

---

Lo scopo fondamentale dei sistemi ITS, che sfruttano, infatti, le conoscenze e gli strumenti dell'Informatica e della Telematica, è dunque quello di integrare le tecnologie di comunicazione tra i veicoli e le reti di trasporto, di persone e merci, consentendo di trasformare i trasporti in un "sistema integrato", nel quale i flussi di traffico sono distribuiti in modo equilibrato tra le varie modalità, per una maggiore efficienza, produttività e sicurezza del trasporto stesso.

La conoscenza aggiornata delle condizioni di traffico della rete è condizione essenziale per l'efficiente funzionamento degli ITS, intesi come sistemi adattivi in grado di modificare le proprie caratteristiche operative in funzione delle condizioni esterne, per il perseguimento degli obiettivi precedentemente dichiarati. Appunto per questo, 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 e per l'individuazione dei punti di maggiore congestione del traffico". Pertanto, l'installazione di dispositivi di conteggio e di rilievo automatico sull'infrastruttura stradale consente di estendere l'obiettivo dall'individuazione dei punti di congestione alla sua riduzione. Inoltre, questa attività di monitoraggio può essere sfruttata per applicare strumenti di informazione e regolazione in tempo reale e rispondere alla conoscenza e alla riduzione delle altre esternalità associate al traffico, in particolare la sicurezza e l'inquinamento atmosferico.

D'altro canto, nel corso degli ultimi anni, grazie anche alle straordinarie opportunità offerte dalla ricerca scientifica e dallo sviluppo delle nuove tecnologie, i servizi di controllo e gestione del traffico e dei trasporti e i servizi di informazione dinamica e di infomobilità resi all'utenza hanno conosciuto, sebbene i bisogni di una società in continua e rapida evoluzione impongano sforzi sempre maggiori, progressivi miglioramenti, apportando benefici in termini di riduzione della congestione, miglioramento dell'ambiente e della sicurezza, aumento dell'efficienza e della produttività dei trasporti.

Si può affermare che l'applicazione coordinata e corretta delle moderne tecnologie ITS di controllo e gestione del traffico, in grado anche di condizionare il comportamento dei viaggiatori e, conseguentemente, di modificare la distribuzione nel tempo e nello spazio del traffico, consente miglioramenti delle prestazioni del sistema di mobilità delle aree urbane e permette di ridurre molte delle esternalità negative ad esso associate.

Pertanto, muovendosi in tale direzione, la ricerca ha come obiettivo finale quello di aumentare la conoscenza della reale dinamica del traffico stradale nelle aree urbane, di monitorare l'affidabilità dell'intero sistema di trasporto e di ottenere dati utili ed informazioni in grado di contribuire alla realizzazione del controllo ottimo del sistema di mobilità, attraverso un uso più efficiente ed integrato dell'infrastruttura stradale e dei dispositivi su di essa presenti.



# CAPITOLO 1

## INTRODUZIONE

### **1.1 L'evoluzione dei trasporti: la crescita della domanda di mobilità motorizzata**

I trasporti rappresentano un settore nevralgico per lo sviluppo economico e sociale di ogni Nazione. È difficile immaginare una crescita economica forte, creatrice d'occupazione e di ricchezza, in assenza di un sistema di trasporto efficiente in grado di sfruttare pienamente il mercato interno e le possibilità offerte dalla globalizzazione degli scambi commerciali.

Negli ultimi decenni il settore dei trasporti è stato caratterizzato da un notevole incremento della domanda di mobilità di passeggeri e merci per tutte le modalità di trasporto e in particolare per la modalità stradale. Nel corso della seconda metà del XX secolo, il parco circolante di autovetture nei paesi europei è andato crescendo in modo continuativo: con andamento moderatamente in aumento dalla seconda metà degli anni 40 alla prima metà degli anni 60, circa 1.980.000 nel 1960 in Italia, in maniera sensibilmente più rapida negli anni 70 e 80, in media 17.700.000 nel 1980 e, in misura via via decrescente negli anni 90 (Figura 1.1). Nel nostro Paese il parco circolante ha raggiunto un andamento convergente verso, indicativamente, quarantadue milioni di veicoli (autovetture, veicoli commerciali e industriali, autobus e motocicli); al termine del primo quadriennio del XXI secolo si contano circa trentatré milioni di autovetture, valore riconducibile orientativamente ai titolari di patente di guida come pure ai potenziali conducenti, tenuto conto della quota di popolazione che non è autorizzata o non è in grado di guidare, per limitazioni d'età, fisiche, psicologiche, economiche o d'altra natura; nel 2010 il valore ammontava a 36,7 milioni. La popolazione non è peraltro aumentata così fortemente, essendo passata da circa 50 milioni nel 1960 a

53.685.300 nel 1970, 56.388.300 nel 1980, 56.694.900 nel 1990, 56.929.500 nel 2000, 58.462.400 nel 2005 e circa 60 milioni nel 2009 (ISTAT, 2011).

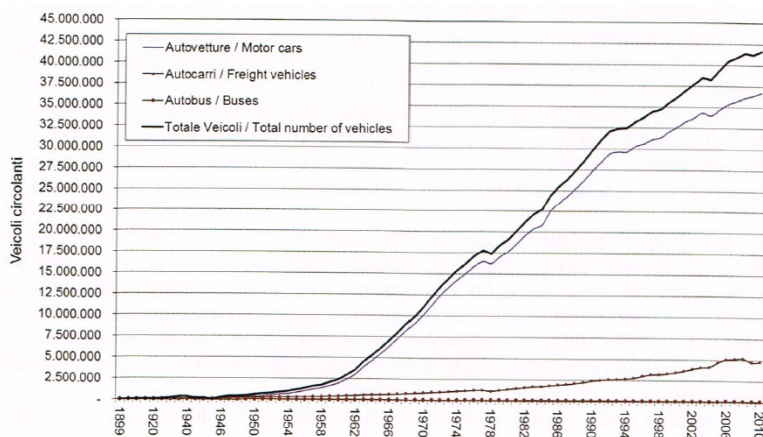


Figura 1.1 Veicoli circolanti in Italia- Anni dal 1899 al 2010

La mobilità motorizzata delle singole persone è andata sempre aumentando nella seconda metà del Novecento, non solo per motivi di lavoro, ma anche per svago, turismo ed un mutato assetto territoriale; attività commerciali concentrate, spostamento delle abitazioni fuori dai centri abitati, ecc.

Con riferimento alla ripartizione modale passeggeri-km (Figura 1.2), si osserva da dati annuali riferiti al 2014, (European Commission, 2016), una percentuale pari al 74% relativa all'uso dell'automobile rispetto alle altre modalità di trasporto.

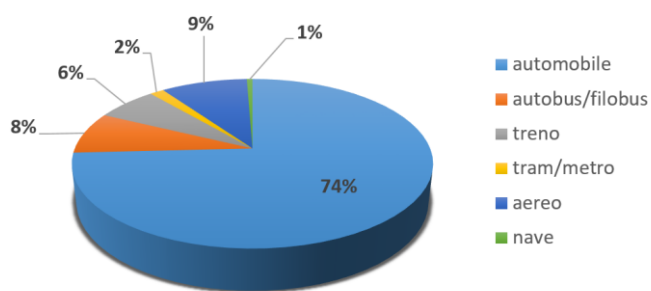


Figura 1.2 Ripartizione modale passeggeri-km - Anno 2014

Ulteriori dati confermano la predominanza dell'uso del mezzo privato rispetto agli altri mezzi di trasporto e come quest'ultimo, in Italia, abbia livelli più elevati rispetto ai valori europei (Figura 1.3).

	Modalità automobile %	Modalità Trasporto Collettivo %	Modalità Ciclabile + Pedonale %
Parigi	17	33	50
Amsterdam	38	20	42
Madrid	38	38	24
Berlino	31	26	43
Roma	67	28	5
Milano	52	36	12
Media UE 27	43	32	25
Media Italia	62	23	15

Figura 1.3 Ripartizione modale nelle città con più di 250 mila abitanti  
(Cascetta, 2013)

Nella maggior parte dei Paesi Europei, dunque, la dominanza dell'uso dell'automobile, anche per viaggi di breve distanza e durante periodi di congestione, mostra chiaramente un alto grado di dipendenza da questa modalità di trasporto. Il numero di autovetture ogni mille abitanti (tasso di motorizzazione), se da un lato rappresenta un indicatore positivamente associato allo standard di vita di un paese, dall'altro consente di misurare l'impatto negativo sulla congestione del sistema viario riconducibile soprattutto alla densità delle autovetture presenti. Il tasso di motorizzazione in Italia è passato da circa 501 autovetture ogni mille abitanti nel 1991 a circa 621 nel 2012, uno dei tassi più alti del mondo e il secondo nell'Ue28, per poi attestarsi a 608 nel 2013 (Figura 1.4).

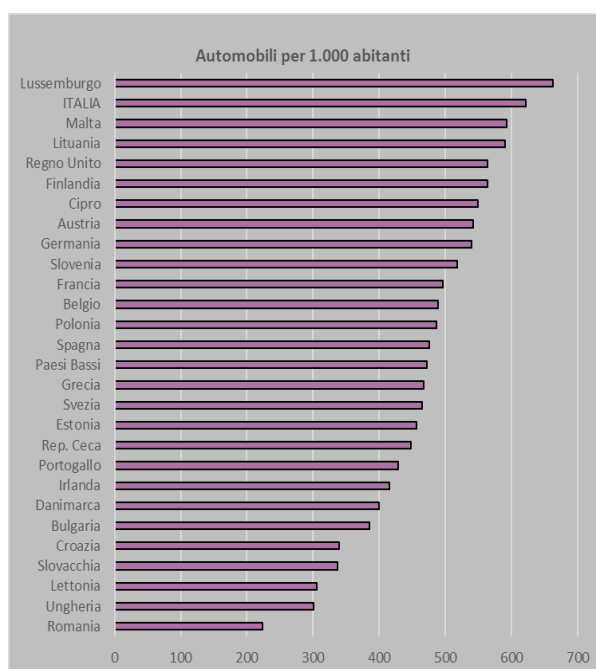


Figura 1.4 Tasso di motorizzazione auto (autovetture per 1000 abitanti)  
(Isfort, 2012)

Per contro, le infrastrutture stradali – alle quali è stata prevalentemente affidata, a partire dagli anni 50, la capacità di soddisfare l'accrescimento della domanda di mobilità associata ad un maggior uso diffuso dell'auto privata – hanno spesso raggiunto, con la fine degli anni 90 e l'inizio del secolo, il limite di saturazione.

L'aumento dell'offerta di infrastrutture stradali, per far fronte alla crescita della domanda di trasporto, non può oggi tuttavia trovare facilmente spazio, sia perché le aree urbanizzate spesso non lo consentono, sia perché una maggiore sensibilità nella protezione dell'ambiente non permette oltremodo una facile realizzazione di nuove strade e autostrade, come invece è accaduto negli anni 60 e 70, sia in Italia che nelle altre principali nazioni europee. I costi di realizzazione, di manutenzione e ammodernamento – in base all'innovazione tecnologica – delle infrastrutture, risultano infine, in molti casi, non sempre economicamente sostenibili.

Dunque, questo fenomeno di rapida crescita della domanda di mobilità ha considerevoli ripercussioni di carattere economico, sociale ed ambientale. Il modello attuale di mobilità manifesta, cioè, la sua "insostenibilità" in tutte le dimensioni dello sviluppo sostenibile e gli impatti negativi sull'ambiente, la qualità della vita e la sicurezza del trasporto continueranno ad aumentare a meno che l'approccio alla mobilità non subisca un cambiamento strutturale.

## **1.2 I costi esterni della mobilità**

Il traffico stradale, soprattutto nelle aree urbane, è diventato uno dei problemi maggiormente sentiti dalla popolazione cittadina e non, tanto per i veicoli quanto per i pedoni, in modo tale da incidere in maniera non trascurabile sulla qualità della vita.

I costi della mobilità, ed in particolare quelli legati al trasporto stradale, sono caratterizzati da pesanti ricadute ambientali e sociali. Esse, sono riconducibili all'immissione di sostanze che producono inquinamento atmosferico, alla generazione di rumore, alla incidentalità, alla congestione stradale e all'occupazione di suolo. Si evince, da questo, che le esternalità negative connesse al sistema dei trasporti sono numerose. Queste ultime differiscono considerevolmente per unità di misura, per dimensione temporale e spaziale in cui esercitano i loro effetti, per la possibilità di identificare una relazione dose/risposta. Queste differenze fanno sì che per alcune di queste si incontrino notevoli difficoltà nella stima del loro valore economico.

Una prima difficoltà deriva dal fatto che mentre per alcuni impatti esiste una unità di misura immediatamente identificabile (consumo di suolo, numero di persone coinvolte in incidenti, rumore, vibrazioni, ecc.), per altri manca una unità di misura aggregata (inquinamento dell'aria, dell'acqua e del suolo) e per altri ancora l'unità di misura è soggettiva (impatto visivo, separazione delle comunità) e dipende da abitudini, gusti,

preferenze.

Inoltre, si individuano diversità nella dimensione temporale relativamente alla manifestazione ed alla percezione del danno. I danni possono essere immediati o di breve periodo (rumore, separazione, impatto visivo, cattivi odori, polveri) oppure di medio-lungo periodo (malattie respiratorie e alterazioni genetiche legate all'inquinamento dell'aria e dell'acqua).

La dimensione spaziale degli impatti ambientali dei trasporti è altresì assai diversificata. Una buona parte degli impatti è relativa all'area circostante il luogo in cui avviene l'attività di trasporto ed è ben localizzata (rumore, impatto visivo, vibrazioni, effetto di separazione, inquinamento da CO, piombo, particolati). Altri impatti, ad esempio quelli prodotti da alcuni inquinanti dell'aria quali SOX, NOX, HC, si manifestano in un'area vasta (smog, piogge acide, ozono troposferico) o sono addirittura globali (riduzione dello strato di ozono, effetto serra causato dalla CO<sub>2</sub> e dai clorofluorocarburi, ozono, ossidi di azoto). Per gli inquinanti soggetti a fenomeni di trasporto si utilizzano modelli di diffusione che, a volte, possono risultare imprecisi e, per di più, in presenza di numerose variabili che dipendono dal comportamento individuale dei conducenti (manutenzione della vettura, stile di guida, etc). Le incertezze connesse alle complesse e, a volte, imprecise definizioni temporali e spaziali degli impatti si sommano inoltre alle incertezze scientifiche sulla definizione della relazione tra esposizione all'inquinamento ed effetti sulla salute, sulla psicologia umana e sugli equilibri ecologici. Tutto ciò, connesso anche allo scarso livello di informazione (dovuto alla mancanza di adeguate reti di monitoraggio), limita la possibilità per gli agenti economici di formare e manifestare le proprie preferenze e quindi la propria disponibilità a pagare. Pertanto, il costo pagato giornalmente dalla collettività in termini di perdite di tempo, inquinamento e sicurezza è enorme, e il rischio è che la domanda di trasporto in continua crescita possa rendere tale costo non più sostenibile.

### **1.2.1 L'inquinamento atmosferico**

Il traffico veicolare costituisce oggi il principale responsabile dell'inquinamento atmosferico nelle aree urbane, a causa della emissione dei prodotti della combustione dei carburanti e della loro successiva trasformazione chimica, nonché a causa della evaporazione degli idrocarburi incombusti. I suoi effetti sono particolarmente deleteri, principalmente in prossimità dei grandi centri urbani, dove ormai si concentrano le attività di una quota rilevante della popolazione mondiale.

Lo stato di inquinamento atmosferico è il risultato di un processo, il *processo di inquinamento atmosferico*, che comprende tutti i fenomeni a cui prendono parte le sostanze inquinanti a partire dalla loro genesi fino all'espletamento della loro azione negativa

sull'ecosistema (Stern, 1976). Tale processo può essere schematicamente suddiviso in un insieme limitato di subprocessi: essi sono la *formazione*, l'*emissione*, la *dispersione* e l'*azione* delle sostanze inquinanti (Figura 1.5).

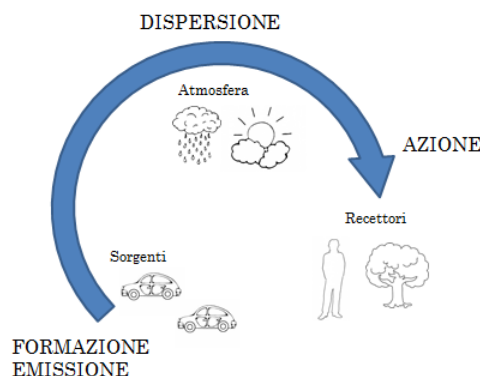


Figura 1.5 Schema del processo di inquinamento atmosferico

Nell'ambito di questi subprocessi, vengono interessati diversi sottosistemi dell'ecosistema globale: le *sorgenti* - responsabili dell'immissione degli inquinanti nell'aria e a loro volta della loro formazione -, l'*atmosfera* - che rappresenta il mezzo attraverso il quale si evolvono -, e infine i *recettori* - ovvero tutti quegli elementi dell'ecosistema (compresa l'aria stessa) che risentono dell'azione dannosa delle sostanze inquinanti.

Il processo di inquinamento atmosferico da traffico è originato dal fatto che i veicoli stradali attualmente in circolazione impiegano come propellenti sostanze idrocarburiche combustibili derivate dal petrolio o da gas naturali e dotate di notevoli potenzialità inquinanti. L'origine di questi combustibili è legata al fenomeno di fossilizzazione di materiale organico al di sotto della superficie terrestre e ai successivi procedimenti di estrazione e raffinamento. La fase sostanziale del processo di formazione delle sostanze inquinanti che vengono poi immesse nell'atmosfera avviene però all'interno degli apparati di propulsione dei veicoli. Questi ultimi costituiscono anche le sorgenti che determinano l'emissione degli inquinanti nell'ambiente esterno. Il subprocesso di dispersione comprende l'evoluzione delle sostanze inquinanti dal momento in cui vengono immesse nell'atmosfera a quello in cui vengono da essa rimosse. La dispersione degli inquinanti è quindi fortemente condizionata dal comportamento dell'atmosfera e dai fenomeni meteorologici che in essa avvengono. Il subprocesso di azione di una sostanza inquinante è principalmente caratterizzata dall'entità della sua presenza nell'aria, dalla sua persistenza e dalle proprietà del recettore.

Gli inquinanti atmosferici si possono suddividere in inquinanti direttamente immessi nell'atmosfera e in inquinanti secondari, formati dalla reazione degli inquinanti primari tra

di loro e con alcuni componenti dell'atmosfera. Tra gli inquinanti atmosferici prodotti dal traffico veicolare vanno ricordati: il monossido di carbonio (CO) derivante dalla combustione incompleta dei carburanti; gli Ossidi di Azoto (NOx) ottenuti per successiva ossidazione dell'NO prodotto in ogni processo di combustione ad alta temperatura e in presenza di ossigeno; il materiale particolato, che include polvere, fumo, microgocce di liquido., e in particolare le particelle con una dimensione inferiore ai 10 µm (PM10) che possono essere inalate direttamente a livello degli alveoli polmonari ; l'Anidride Solforosa (SO<sub>2</sub>) derivante dalla combustione di gasolio e di oli minerali contenenti piccole percentuali di Zolfo; i Composti Organici Volatili (COV), derivanti dalla combustione incompleta degli idrocarburi e dalla evaporazione di solventi e carburanti: tra questi vi sono la frazione non metanica di COV prodotta dal traffico veicolare; il Benzene, composto aromatico cancerogeno, prodotto sia per evaporazione dalla benzina che per la sua incompleta combustione; gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) quali il Benzopirene, derivanti principalmente dai processi di combustione incompleta dei carburanti.

### **1.2.1.1 Effetti dell'inquinamento sull'uomo**

Il complesso ecosistema del nostro pianeta può essere fortemente influenzato dall'alterazione della composizione media dell'atmosfera. Alcuni effetti sono specifici e misurabili, altri sono di difficile individuazione e quantificazione.

In generale gli effetti dell'inquinamento dell'aria possono essere identificati a due diversi livelli. Si possono cioè distinguere quindi gli effetti che intervengono sulle proprietà e sul comportamento dell'atmosfera da quelli che intervengono sulle componenti del sistema geologico e biologico della terra. Della prima categoria fanno parte gli effetti sull'odore dell'aria, sulla visibilità e sui fenomeni meteorologici. Della seconda categoria di effetti fanno parte quelli su materiali e sulla salute delle diverse specie viventi.

L'inquinamento atmosferico rappresenta da molti anni un problema di salute pubblica. Gli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla salute dell'uomo rivestono una importanza particolare nel riconoscimento della pericolosità delle sostanze presenti nell'aria e nella definizione dei limiti normativi delle relative concentrazioni. Ciò vale in particolare per l'inquinamento da traffico, le cui conseguenze rappresentano attualmente uno dei più grandi problemi legati allo sviluppo delle attività umane. Le tipologie di effetto vengono generalmente distinte in due classi; gli effetti acuti, ovvero quelli che si manifestano in lassi di tempo molto brevi in seguito all'esposizione a quantità elevate di inquinante, e gli effetti cronici, di solito associati a lunghi periodi di esposizione e a concentrazioni nocive non necessariamente alte.

La valutazione dell'esposizione della popolazione generale e il legame con gli effetti sulla

salute a breve e lungo termine sono oggetto di studio e i criteri e metodi di approccio hanno subito nel tempo un'evoluzione continua. Le evidenze scientifiche che emergono sottolineano l'esistenza di eccessi di rischio sulla mortalità e sulla morbosità della popolazione generale e di individui suscettibili esposti ai livelli di concentrazione degli inquinanti normalmente rilevati nelle aree urbane del nostro paese.

Individuare un'"esposizione media" di una popolazione è un esercizio molto complesso in considerazione dei numerosi fattori che contribuiscono all'incertezza complessiva di una stima di questo tipo. L'approccio lungamente seguito è stato quello di determinare la concentrazione in siti fissi outdoor degli inquinanti via via ritenuti di maggior rilevanza sanitaria; tipicamente le concentrazioni rilevate presentano una marcata variabilità spaziotemporale. Tale variabilità è governata in modo decisivo dalla prossimità alle sorgenti prevalenti, in particolare qualora la sorgente prevalente sia il traffico veicolare, e dalle condizioni meteorologiche del luogo, che influenzano le dinamiche di diluizione, dispersione, trasporto e deposizione e possono favorire o meno le trasformazioni chimiche che possono subire gli inquinanti una volta emessi dalle varie sorgenti.

### **1.2.1.2 Legislazione italiana in merito all'inquinamento atmosferico**

Le emissioni inquinanti si traducono in concentrazioni atmosferiche, più o meno elevate, di sostanze nocive. Spetta al legislatore, quindi, fornire dei criteri di accettabilità per le concentrazioni risultanti che tengano conto, in primo luogo, dei possibili danni per la salute derivanti da limiti troppo elevati, ma anche dei possibili danni alle attività produttive e commerciali derivanti da limiti troppo bassi.

Nei paesi civilizzati esistono normative finalizzate a mantenere un certo standard di qualità dell'aria e a mitigare la presenza in essa di sostanze inquinanti. Tali norme fissano, per ciascun inquinante o classe di inquinanti, valori ammissibili predefiniti di concentrazione (soglie di inquinamento ammissibile o standard di qualità dell'aria) (D.M. 15/04/94). Questi limiti vengono stabiliti in modo tale che, sulla base del livello di conoscenza disponibile, se la concentrazione delle sostanze inquinanti rimane al di sotto di questi valori gli effetti sulla salute umana non sono tali da modificare significativamente il rischio di subire effetti dannosi reversibili o irreversibili. Per ciascuna di esse o per ogni loro classe, le norme europee e italiane fissano quattro "livelli" ammissibili di concentrazione:

- **VALORI LIMITE DI QUALITÀ DELL'ARIA:** per valori di concentrazione superiori a tali limiti i rischi per la salute si ritengono intollerabili;



- **LIVELLI DI ALLARME:** valori che richiedono interventi di mitigazione immediati per evitare il raggiungimento dei valori limite. Inoltre se questi valori vengono mantenuti per lunghi periodi possono essere dannosi;
- **LIVELLI DI ATTENZIONE:** valori che, se permangono a lungo possono portare al raggiungimento dei livelli di allarme;
- **VALORI GUIDA DI QUALITA' DELL'ARIA:** livelli di concentrazione che, se mantenuti, assicurano nel tempo la salvaguardia della salute e dell'ambiente.

Lo sviluppo della legislazione sulle emissioni inquinanti da veicoli a motore ha avuto inizio nella comunità europea nel 1968 con la stesura, da parte della commissione ECE (United Nation Commission for Europe) del regolamento denominato ECE 15. Tale regolamento è entrato poi in vigore nel 1970, attraverso la direttiva 70/220/EEC. La comunità europea ha stabilito nel regolamento ECE-15 la procedura che deve essere adottata per il rilevamento delle emissioni dei veicoli a motore. Sono previsti due diversi cicli di guida, uno urbano (ECE-15 U) e uno extra urbano (ECE-15 E).

La normativa Italiana sulle emissioni inquinanti prodotte dai veicoli a motore è sostanzialmente costituita da una serie di atti che recepiscono le diverse direttive della comunità europea. Il primo decreto relativo alla ricezione delle normative europee è datato 1974 e forniva le Prescrizioni generali per l'omologazione CEE dei veicoli a motore e dei loro rimorchi nonché dei loro dispositivi di equipaggiamento. Dello stesso anno è il decreto che dettava le norme per l'omologazione parziale CEE dei veicoli a motore ad accensione spontanea per quanto riguarda l'emissione di fumo, decreto che recepiva la direttiva comunitaria 72/306/EEC.

La prima legge italiana organica sull'inquinamento atmosferico, che individua l'aria come un bene giuridico da proteggere, è la Legge del 13 luglio 1966, n. 615 "Provvedimenti contro l'inquinamento atmosferico", la quale è stata sostituita dal Decreto del Presidente della Repubblica n. 203 del 24 maggio 1988, che recepiva quattro direttive europee in materia di inquinamento e qualità dell'aria, che si può considerare come la base della normativa italiana in materia di inquinamento atmosferico sino al recepimento nel 1999 della direttiva quadro europea sulla "Valutazione e gestione della qualità dell'aria". Il DPR ha introdotto il concetto di protezione dell'ambiente, dando una definizione chiara di inquinamento atmosferico, che viene dalla stessa individuato come: "ogni modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica, dovuta alla presenza nella stessa di uno o più sostanze in quantità o con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria, da costituire pericolo ovvero pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo; da compromettere le attività ricreative e gli altri usi legittimi dell'ambiente, alterare le risorse biologiche e gli ecosistemi ed i beni materiali pubblici e privati". Inoltre, ha introdotto valori limite e valori guida per la qualità dell'aria e il concetto, di derivazione anglosassone, di migliore tecnologia disponibile.

Le prescrizioni tecniche in materia di emissioni inquinanti sono state poi via via modificate nel corso degli anni attraverso il miglioramento delle tecnologie e il conseguente aggiornamento delle direttive. Di seguito si mostrano alcune delle leggi e decreti che sono più rappresentativi fra quelli promulgati negli ultimi 20 anni:

- 1991: *D. M. 20/5/91*, Criteri per la raccolta dei dati inerenti la qualità dell'aria.
- 1992: *D. M. 6/5/92*, Definizione del sistema finalizzato al controllo ed assicurazione di qualità dei dati di inquinamento atmosferico ottenuti dalle reti di monitoraggio.
- 1994: *D. M. 15/4/94*, Norme tecniche in materia di livelli e di stati di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane.
- 1994: *D. M. 25/11/94*, Aggiornamento delle norme tecniche in materia di limiti di concentrazione e di livelli di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane e disposizioni per la misura di alcuni inquinanti.
- 1999: *D. Lgs. 4/8/99 n. 351*, Attuazione della Direttiva 96/62/CE in materia di valutazione e di gestione della qualità dell'aria ambiente, che stabilisce le competenze di Stato e Regioni.
- 2000: *Direttiva 00/69/CE*, Valori limite di qualità dell'aria per il benzene ed il monossido di carbonio.
- 2002: *D. M. n.60 2/4/02*, Recepimento della direttiva 1999/30/CE del Consiglio del 22 aprile 1999 e della direttiva 2000/69/CE, rispettivamente relative a NOx, SO2, Pb e PM10 nell'aria ambiente, e relative al benzene e al monossido di carbonio.
- 2004: *Legge 30 giugno 2004, n. 185*, Ratifica ed esecuzione dell'Emendamento al Protocollo di Montreal sulle sostanze che impoveriscono lo strato di ozono, adottato durante la XI Conferenza delle Parti a Pechino il 3 dicembre 1999.
- 2006: *Decreto del 16 ottobre 2006*, Programma di finanziamenti per le esigenze di tutela ambientale connesse al miglioramento della qualità dell'aria e alla riduzione delle emissioni di materiale particolato in atmosfera nei centri urbani.
- 2007: *Decreto del 29 gennaio 2007*, Recepimento della direttiva 2005/55/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 28-7-2005 relativa agli inquinanti gassosi e al particolato emessi dai motori dei veicoli.
- 2010: *Decreto legislativo n.155 del 13 agosto 2010*, Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa.

In merito al decreto legislativo n.155 del 2010, si può dire che le sue finalità sono:

- a) Individuare obiettivi di qualità dell'aria ambiente volti a evitare, prevenire o ridurre effetti nocivi per la salute umana e per l'ambiente nel suo complesso;
- b) Valutare la qualità dell'aria ambiente sulla base di criteri e metodi comuni su tutto il territorio nazionale;
- c) Ottenere informazioni sulla qualità dell'aria ambiente come base per individuare le

misure da adottare per contrastare l'inquinamento e gli effetti nocivi dell'inquinamento sulla salute umana e sull'ambiente e per monitorare le tendenze a lungo termine, nonché i miglioramenti dovuti alle misure adottate;

- d) Mantenere la qualità dell'aria ambiente, laddove buona, e migliorarla negli altri casi;
- e) Garantire al pubblico le informazioni sulla qualità dell'aria ambiente;
- f) Realizzare una migliore cooperazione tra gli Stati dell'Unione Europea in materia di inquinamento atmosferico.

Il decreto quindi stabilisce:

- I valori limite per le concentrazioni nell'aria ambiente di biossido di zolfo, biossido di azoto, benzene, monossido di carbonio, piombo e PM10;
- I livelli critici per le concentrazioni nell'aria ambiente di biossido di zolfo e ossidi di azoto;
- Le soglie di allarme per le concentrazioni nell'aria ambiente di biossido di azoto e biossido di zolfo;
- Il valore limite, il valore obiettivo, l'obbligo di concentrazione dell'esposizione e l'obiettivo nazionale di riduzione dell'esposizione per le concentrazioni nell'aria ambiente di PM2.5;
- I valori obiettivo per le concentrazioni nell'aria ambiente di arsenico, cadmio, nichel e benzo(a)pirene.

## **1.2.2 Il cambiamento climatico**

I trasporti su strada consumano grandi quantità di risorse energetiche soprattutto da fonti non rinnovabili, causando l'immissione in atmosfera di numerose sostanze inquinanti fra cui le sostanze acidificanti, i precursori dell'ozono e il particolato fine. In questo contesto, i cambiamenti climatici sono, purtroppo una realtà.

Oggi sul nostro pianeta si registrano le temperature medie più alte probabilmente da duemila anni a questa parte e questo ha già iniziato a modificare il clima, come dimostrano le maggiori ricerche scientifiche del settore. Entro la fine del secolo, se le tendenze attuali continueranno, la temperatura media globale probabilmente raggiungerà il picco più alto degli ultimi due milioni di anni.

Quello che preoccupa è che l'attuale riscaldamento globale non dipende da meccanismi naturali, ma dalle attività umane e principalmente dall'emissione di anidride carbonica derivante soprattutto dall'utilizzo di combustibili fossili.

Il sistema dei trasporti rappresenta il settore in cui è stato registrato un trend di crescita delle emissioni di GHG (Figura 1.6). Ciò ha contribuito a far sì che esso venga indicato quale causa principale per la mancata riduzione delle emissioni in Europa, in contrasto con gli

obiettivi stabiliti dalla stessa UE. Tutte le previsioni rivelano inoltre che le emissioni di gas serra generate dai trasporti continueranno ad aumentare a meno che non vengano prese misure contrapposte che vadano nella direzione opposta.

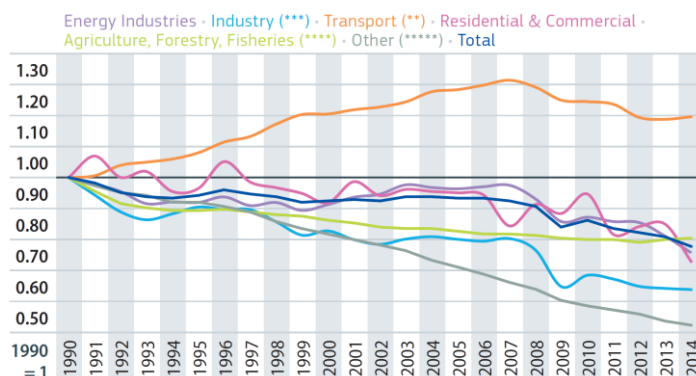


Figura 1.6 Trend delle emissioni di GHG per differenti settori  
(European Commission, 2016)

In particolare, i trasporti su strada sono responsabili dell'emissione nell'atmosfera di un'aliquota pari al 72,1% delle emissioni globali di gas-serra per i vari modi di trasporto (Figura 1.7). Con il trend attuale, si profila all'orizzonte una crescita della concentrazione di questi gas che causerà, nei prossimi decenni, un incremento dell'effetto serra e, quindi, un ulteriore innalzamento della temperatura media del Pianeta con conseguente aumento dei fenomeni metereologici esterni, quali nevicate intense, aumento del rischio di valanghe, esondazioni e colate di fango causate da piogge torrenziali e tempeste, ostacolando i trasporti e arrecando danni ingenti alle infrastrutture che implicheranno l'esborso di elevati capitali per il ripristino delle stesse.

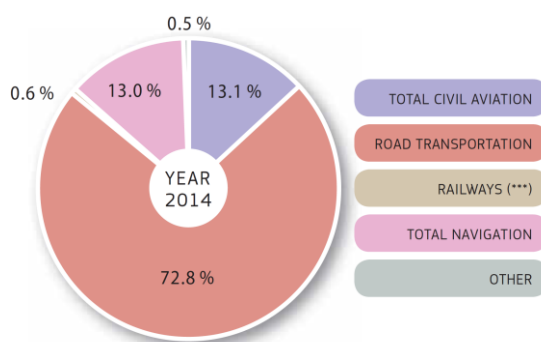


Figura 1.7 Trend delle emissioni di GHG per modo di trasporto  
(European Commission, 2016)

### 1.2.3 L'inquinamento acustico

Escludendo le zone in prossimità di ferrovie ed aeroporti, per quanto riguarda l'inquinamento acustico, la principale sorgente di rumorosità ambientale è imputabile al traffico urbano a causa del rumore dovuto ai mezzi di trasporto.

All'origine del rumore veicolare è possibile individuare varie sorgenti che rientrano in due principali categorie: quelle correlate con il numero di giri del motore (power train) e quelle correlate con la velocità del veicolo su strada. Nella prima categoria, che è indipendente dalla seconda, rientrano il motore, l'impianto di aspirazione e scarico, la ventola di raffreddamento, gli alberi di trasmissione, il cambio, le pompe idrauliche e i generatori elettrici. Nella seconda, invece, rientrano il rumore provocato dall'interazione pneumatici-strada e il rumore aerodinamico. Componendo questi due livelli si ottiene il livello globale, che spesso supera i valori massimi consentiti. Infatti, l'inquinamento acustico causato dai mezzi di trasporto degrada la qualità dell'ambiente circostante perché molto spesso si raggiungono livelli tali da interferire con le attività degli abitanti.

### 1.2.4 La congestione

La congestione è dovuta a vari fattori: sproporzione tra traffico e capacità dell'infrastruttura, incidenti, interruzioni del flusso dovute a lavori in corso o interruzioni. Dal punto di vista quantitativo, il più importante è il primo dei fattori citati: la congestione che si genera quando il traffico non viene sufficientemente assorbito dalla capacità dell'infrastruttura, cioè quando il tempo di viaggio supera il valore che avrebbe se i flussi e le condizioni di traffico fossero "normali", in linea con quanto previsto in fase di progettazione con l'infrastruttura. Questo fenomeno determina per gli utenti un aumento del tempo necessario a compiere uno spostamento ed ha effetti di natura ambientale quali il maggior consumo di carburante cui consegue l'aumento dell'inquinamento.

Negli ultimi anni, la diffusione della motorizzazione e il conseguente aumento dei volumi di traffico, ha portato ad un esacerbamento dei fenomeni di congestione stradale. Quest'ultima comporta costi a carico delle famiglie, delle imprese e dei bilanci pubblici, che possono essere diretti o indiretti. Quelli diretti consistono nell'aumento dei tempi di percorrenza, nel costo economico del perditempo per famiglie e aziende, nello stress, nel maggiore inquinamento. I costi indiretti possono essere individuati nel decadimento del paesaggio e dell'ambiente urbano, nella sosta selvaggia sulle strade urbane, nel danneggiamento dei monumenti e nella perdita di attrattività della città. I costi indiretti non colpiscono solo gli automobilisti, ma tutti i cittadini. A lungo termine, i costi indiretti sono più nocivi per la città di quelli diretti, ma spesso vengono gravemente sottovalutati.

La Commissione Europea stima che, nell'ambito comunitario, il costo sociale derivante dalla congestione stradale sia pari all'1% del Prodotto Interno Lordo dell'UE.

## 1.2.5 L'incidentalità

La dimensione dei costi sociali derivanti dall'incidentalità che ogni anno coinvolge il sistema dei trasporti è, per lo più, da imputare ai trasporti su strada piuttosto che ai trasporti ferroviari ed aerei.

Nella sola Unione Europea, nel 2000 si sono registrate più di 40.000 vittime per incidenti stradali e oltre 1.7 milioni di feriti. I costi diretti sostenuti per gli incidenti stradali sono pari a 45 miliardi di Euro, mentre i costi indiretti (compresi i danni fisici e morali subiti dalle vittime e dalle loro famiglie) sono 3-4 volte superiori. Si tratta di un importo annuo di 160 miliardi di Euro, equivalente al 2% del Prodotto Interno Lordo dell'intera Unione Europea (Libro Bianco, 2001). Nel 2013 si sono registrati in Italia 181.227 incidenti stradali con lesioni a persone. Il numero dei morti (entro il 30° giorno) ammonta a 3.385, quello dei feriti a 257.421. La categoria di veicolo più coinvolta in incidente stradale è quella delle autovetture (67,5%); seguono i motocicli (12,8%), gli autocarri (6,4%), le biciclette (5,3%) e i ciclomotori (4,5%).

Le statistiche mettono in evidenza che il fenomeno, nel lungo periodo, è complessivamente in fase di ridimensionamento. Infatti, i dati indicano che sia gli incidenti sia il numero di decessi ad essi conseguenti si sia progressivamente ridotto. Rispetto al 2012, il numero di incidenti scende del 3,7%, quello dei feriti del 3,5% mentre per il numero dei decessi la flessione è del 9,8%. Tra il 2001 e il 2013 la riduzione delle vittime della strada è stata del 52,3%, in valore assoluto si è passati da 7.096 a 3.385 (Figura 1.8). Le principali motivazioni del ridimensionamento del fenomeno della mortalità sono da ricercare principalmente nei miglioramenti dei sistemi di sicurezza introdotti sugli autoveicoli e nel miglioramento della qualità delle cure sanitarie.

Tuttavia, se non si interviene su questo fronte, l'incidentalità stradale potrà essere considerata la terza causa di morte nel 2020.

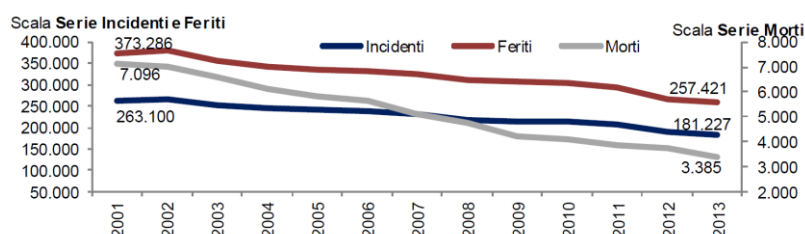


Figura 1.8 Incidenti stradali con lesioni a persone, morti e feriti – Anni 2001-2013  
(ISTAT, 2014)

### **1.2.6 L'intrusione visiva e il consumo di suolo**

Per intrusione visiva si intende l'effetto sull'impatto visivo che una struttura di trasporto produce nell'ambiente che la circonda. L'intrusione visiva è un'esternalità assai difficile da quantificare dal momento che nella sua valutazione giocano in ampia misura elementi di giudizio estetici ed etici fortemente soggettivi.

L'effetto barriera è l'effetto di separazione fisica conseguente alla presenza di un asse di trasporto che o rende più difficili i collegamenti all'interno di una comunità. L'entità dell'effetto dipende dalle caratteristiche dell'infrastruttura (larghezza, numero di attraversamenti pedonali o rampe), dal tipo di traffico che vi si svolge (entità, velocità) e dalle caratteristiche della comunità interessata. Come indicatori dell'entità dell'effetto barriera si ricorre solitamente al numero di relazioni impedito o all'allungamento dei tempi di attraversamento.

Le attività di trasporto sono caratterizzate da un elevato consumo di uso del suolo come sede delle infrastrutture e per la sosta dei veicoli. Si ritiene che, tra tutti i modi di trasporto, il modo stradale sia quello che ha il più elevato consumo del suolo, anche se non esistono precise stime quantitative per le intuibili difficoltà di misurazione.

## **1.3 Strategie di mitigazione: I Sistemi di Trasporto Intelligenti**

La sfida che tutti i Paesi industrializzati si pongono è di garantire ad ogni cittadino e alle merci la possibilità di viaggiare in modo sicuro, efficiente e compatibile con l'ambiente, utilizzando tutti modi di trasporto disponibili.

Le esperienze condotte in questi anni in numerosi Paesi Europei, negli Stati Uniti ed in Giappone, hanno permesso di verificare che questo obiettivo non può essere raggiunto solo attraverso la realizzazione di nuove infrastrutture, che sono comunque necessarie e previste.

Occorre anche intervenire direttamente sulla domanda di trasporto, distribuendo i flussi di traffico in modo equilibrato tra le varie modalità e ottimizzando l'utilizzo delle infrastrutture per permettere spostamenti più sicuri, veloci ed economici.

Le strategie a medio/lungo termine mirano a ridurre le emissioni dei veicoli migliorando la tecnologia dei motori, usando combustibili più puliti su scala nazionale e sovra nazionale. Quelle a breve termine, dall'altro lato, puntano a ridurre le cause dello spostamento, a regolare i flussi veicolari sulla rete e a razionalizzare la circolazione, intervenendo sia sulla domanda sia sull'offerta di trasporto, attraverso strumenti tecnici e/o politici, su scala locale.

Le strategie a breve termine, inoltre, tendono a gestire il traffico e a ridurre le emissioni proprio nei punti (hot-spots) dove il traffico veicolare causa maggiori problemi, in termini di impatti sulla salute e, quindi, dei danni causati dall'esposizione umana agli agenti inquinanti.

La situazione di congestione delle città e l'accumulo di inquinanti secondari (come ozono e NO<sub>2</sub>), intensificato dalla notevole presenza di inquinanti primari possono essere ridotti solo attraverso interventi di lunga durata, che mirino a migliorare le condizioni di circolazione sulla rete urbana.

Una strategia di intervento mirata alla riduzione della congestione del sistema stradale è rappresentata da una coraggiosa politica pubblica di riequilibrio tra le diverse modalità di trasporto, con investimenti straordinari ed interventi strutturali che permettano di valorizzare le peculiarità di ogni singolo mezzo. Bisogna incentivare, dove è possibile ed opportuno, il traffico marittimo, quello aereo e quello su rotaia, in relazione ai loro minori costi esterni. Questo significa conoscere il funzionamento, le caratteristiche ed i limiti del sistema dei trasporti, ma significa anche ricercare come possano essere meglio combinate le diverse modalità di trasporto nell'interesse della società e dei singoli individui. È necessario, quindi, che lo Stato intervenga per armonizzare l'interesse collettivo ed individuale tramite meccanismi regolamentari, fiscali o tariffari che quantifichino gli effetti esterni, in modo tale che la struttura dei costi del soggetto economico risulti uguale a quello della collettività. In questo senso il principale obiettivo dovrà essere il contenimento del trasporto su gomma, il quale presenta indubbi vantaggi di comodità, di flessibilità e di capillarità di percorso (door to door) senza alcuna rottura di carico, ma che ha ormai raggiunto livelli difficilmente sostenibili da un punto di vista collettivo, specialmente nell'ambito degli agglomerati urbani.

Ulteriori strategie per la riduzione delle esternalità negative dei trasporti mirano al miglioramento dell'offerta di trasporto alternativo al trasporto stradale, allo sviluppo dell'intermodalità, alla promozione delle mobilità dolci e, soprattutto, allo sviluppo dei Sistemi Intelligenti di Trasporto (ITS).

Il progresso dei sistemi ITS (Intelligent Transportation Systems) e dell'infomobilità (la gestione intelligente dei processi della mobilità e dell'informazione che li accompagna) rappresentano una opportunità per ridurre, con costi e tempi sostenibili, la congestione sulle infrastrutture stradali, regolare, limitare e ottimizzare i percorsi dei flussi di traffico producendo benefici per la qualità della vita e per il miglioramento delle prestazioni funzionali e ambientali dell'intero sistema di trasporto.

### **1.3.1 Definizione di ITS**

ITS, acronimo di *Intelligent Transport Systems*, è una sigla entrata ormai nell'uso comune ed utilizzata – come termine – anche nella recente normativa europea e nazionale.



Nella lingua italiana ITS può essere definito, letteralmente, come “Sistemi di trasporto intelligenti” (STI) – e così è indicato nella normativa recente – ma anche, forse più concretamente seppure in modo più limitativo, “Sistemi di trasporto interconnessi”; nel caso di un sistema di trasporto, l’aggettivo intelligente è usato quindi con riferimento all’intelligenza retrostante la tecnologia, indicando la capacità del sistema stesso d’interconnettere le sue componenti in maniera efficace, in relazione al perseguimento di un predeterminato obiettivo.

Gli ITS nascono dall’applicazione delle tecnologie informatiche, elettroniche e delle telecomunicazioni (ICT) ai sistemi di trasporto. Gli ITS possono essere sinteticamente definiti come l’insieme di procedure, sistemi e dispositivi che consente attraverso la raccolta, l’elaborazione e la distribuzione di informazioni di migliorare la mobilità, di ottimizzare tutte le modalità di trasporto di persone e merci, nonché di verificare e quantificare i risultati raggiunti. Essi comprendono un range di strumenti per la gestione delle reti di trasporto, così come i servizi per i viaggiatori.

L’introduzione dei sistemi ITS consente di affrontare i problemi della mobilità in modo nuovo, ossia con un approccio sistemico. Infatti, tali Sistemi, fondati sull’interazione fra Informatica e Telecomunicazioni (Figura 1.9), consentono di trasformare i trasporti in un “sistema integrato”, in cui informazione, gestione e controllo operano in sinergia ottimizzando l’uso delle infrastrutture, dei veicoli e delle piattaforme logistiche.

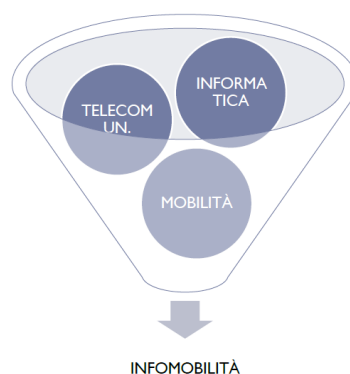


Figura 1.9 Interazioni nei sistemi ITS

Si tratta di sistemi in grado di “conoscere”, misurando o stimando nel tempo, le variabili di stato ed al contorno che ne determinano il funzionamento ed eventualmente di suggerire o attuare direttamente decisioni e strategie pregresse, anche in maniera adattiva: in sostanza un sistema con prestazioni autonome di autonome di autoregolazione, in risposta a variazioni delle condizioni esterne.

### 1.3.2 Il ruolo della telematica nel sistema di trasporto

L'applicazione ai trasporti dei metodi e delle tecnologie proprie dell'informatica e delle comunicazioni ha permesso di sviluppare sistemi capaci di affrontare in modo "intelligente" i problemi della mobilità e del trasporto nella loro globalità.

L'applicazione della telematica ai sistemi di trasporto, mettendo in comunicazione componenti del sistema anche molto lontane tra loro, può aumentare enormemente il livello di informazione sullo stato vicino e remoto del sistema e consentire di elaborare strategie d'intervento e di informazione in tempi rapidi, di metterle in atto e di monitorarle. Il sistema diventa così più efficiente, più efficace e più sicuro (Figura 1.10).

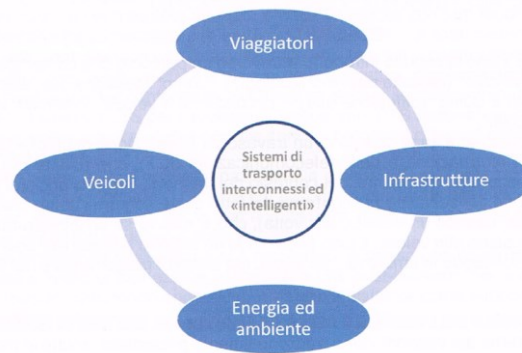


Figura 1.10 La telematica applicata al sistema dei trasporti  
(Dalla Chiara et al., 2013)

In una visione più aggregata del sistema di trasporto, non esclusivamente focalizzata sul modo stradale, si può parlare di: rete di trasporto, flussi di traffico e domanda di trasporto, e dalla loro interazione con le fonti energetiche e con l'ambiente esterno in senso lato.

Queste componenti aggregate interagiscono in un ambiente esterno assai più vasto e complesso di quello delle componenti unitarie, poiché l'interazione non si verifica solo sulla infrastruttura tra veicoli o convogli vicini tra loro, ma interviene sull'insieme delle scelte presenti e future (ad esempio, la scelta dell'ora di partenza dipende dalle esperienze di viaggio precedenti, dalla congestione sperimentata o dalle informazioni acquisite eventualmente anche in tempo reale), così come su componenti di traffico spazialmente anche distanti tra loro, per effetto dell'interazione sulla rete di percorsi anche molto diversi.

L'applicazione della telematica può essere vista allora in una cornice più generale, che va dall'informazione all'utenza per migliorare l'efficienza delle scelte di trasporto merci e mobilità delle persone, alla gestione dinamica della domanda e dell'offerta di trasporto mediante sistemi di regolazione controllo, all'accesso alle zone di ricarica per i veicoli, all'uso più sicuro ed efficiente delle risorse energetiche, al monitoraggio delle scorie rilasciate

nell'ambiente. Queste componenti costituiscono un sistema, cioè come insieme di elementi interagenti, ed i sistemi di trasporto intelligenti consistono appunto in un insieme di tecnologie e metodi progettati, applicati in forma integrata, per rendere più efficiente e sostenibile l'intero sistema.

Nella Figura 1.11 sono rappresentate le componenti aggregate del sistema di trasporto.

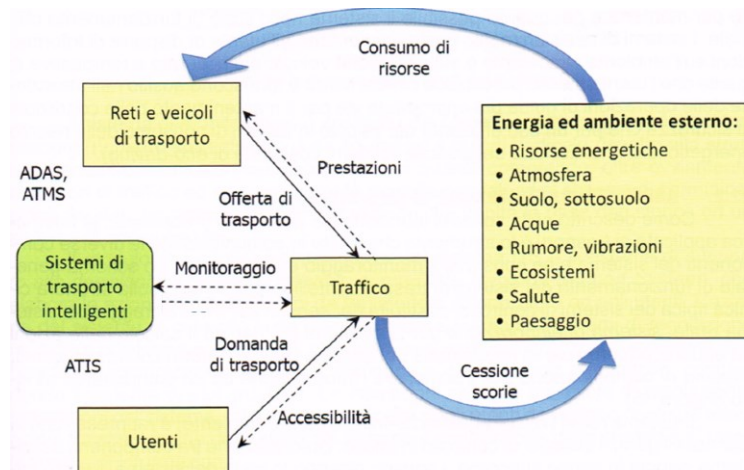


Figura 1.11 Il ruolo degli ITS nell'ambito del sistema domanda offerta di trasporto e delle loro interazioni con l'energia e l'ambiente esterno

(Dalla Chiara et al., 2013)

Gli utenti, che costituiscono nel loro insieme la domanda di trasporto; le reti ed i veicoli di trasporto, che determinano le caratteristiche dell'offerta; la loro interazione, che rappresenta il traffico sulla rete e determina il livello di prestazioni dell'offerta in funzione della congestione ed il livello di accessibilità al territorio da parte degli utenti; l'energia e l'ambiente esterno, da cui reti e veicoli di trasporto prelevano e consumano risorse naturali: in primo luogo energia, ma anche materie prime per la costruzione di veicoli ed infrastrutture, nonché ossigeno nei processi di trasformazione dell'energia verso l'ambiente in cui vengono rilasciate le scorie, chimiche e fisiche, dovute al traffico.

I Sistemi di Trasporto Intelligenti intervengono in queste interazioni attraverso molteplici sistemi avanzati, ai quali sarà dedicata una trattazione approfondita nel capitolo successivo del presente lavoro.

### 1.3.3 Benefici apportati dagli ITS

Negli ultimi anni il rapido sviluppo della telematica e dell'informatica ha fortemente incrementato la presenza sul mercato di sistemi tecnologici che i responsabili delle

Amministrazioni locali e delle Aziende di Trasporto si trovano a dover valutare nel momento in cui decidono di rispondere a determinate esigenze aziendali e di controllo sulla rete mediante l'introduzione e la gestione di un sistema ad elevato contenuto tecnologico. Questa offerta rappresenta per gli operatori (pubblici o privati, pianificatori o gestori, utenti o fornitori di servizi) una scelta ampia e variegata di possibilità realizzative che interessano praticamente tutte le aree della mobilità, sia essa urbana che di bacino: dai sistemi per la gestione del traffico veicolare (acquisizione dei dati di traffico, controllo semaforico, controllo degli accessi, gestione dei parcheggi, pannelli a messaggio variabile, centri di supervisione e controllo integrati, ecc.), ai sistemi per l'informazione agli utenti (indicazioni di percorso e instradamento ai parcheggi, informazioni pre-viaggio via televisione, Internet, centri di servizi informativi per il trasporto, call center, ecc.), dai sistemi per la gestione del trasporto collettivo (monitoraggio e localizzazione delle flotte, automazione dei depositi, servizi a chiamata, ecc.), ai sistemi per l'integrazione modale, fino alle piattaforme per la logistica (sistemi Park and Ride, sistemi di pagamento con smart-card, sistemi di distribuzione delle merci, sistemi misti merci/passeggeri, ecc.).

L'adozione di questi sistemi interessa principalmente i seguenti aspetti: il *miglioramento della sicurezza stradale* – favorendo sistemi di guida automatici per la riduzione degli incidenti causati da errori umani –; la *diminuzione della congestione* – fornendo informazioni ai viaggiatori sulle condizioni di traffico nei diversi archi della rete e sui relativi tempi di percorrenza e, utilizzando sistemi per effettuare una scelta più ragionata della strada da seguire incrementando l'efficienza operativa del sistema –; la *riduzione dell'impatto ambientale* – tramite una ottimizzazione del sistema dei trasporti ai fini della diminuzione della congestione del traffico e delle conseguenti emissioni di gas nocivi –; lo *sviluppo economico* – tramite la collocazione sul territorio di sistemi ITS in grado di generare vantaggi indiretti sull'economia attraverso l'attrazione di attività che dipendono da sistemi di trasporto efficienti.

L'esercizio dei Sistemi finora realizzati, sia a livello urbano che extraurbano, ha permesso di valutare in modo tangibile i benefici apportati dagli ITS e come essi hanno contribuito significativamente a migliorare l'efficienza, la sicurezza, l'impatto ambientale e la produttività complessiva del sistema di trasporto.

La Commissione Europea, nel Libro Bianco "La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte" (settembre 2011), riporta che nel settore stradale sono state ottenute riduzioni dei tempi di spostamento nell'ordine del 20%, diminuzione dei consumi energetici e delle emissioni inquinanti rispettivamente del 12% e del 10%, nonché aumenti della capacità della rete del 5-10%. Si è riscontrato un miglioramento in termini di sicurezza del 10-15% grazie alle strategie coordinate di informazione e controllo, e un aumento anche delle percentuali di sopravvivenza, dovuto ai sistemi automatici di segnalazione degli incidenti e di gestione delle situazioni di emergenza.

Questi risultati positivi dimostrano i vantaggi che i Sistemi ITS possono apportare, in una logica di sviluppo sostenibile, all'ambiente e al miglioramento dell'efficienza, della produttività e, soprattutto, della sicurezza dei trasporti, a fronte di investimenti relativamente modesti e, comunque, di ordini di grandezza percentualmente molto inferiori a quelli necessari alla realizzazione di nuove infrastrutture, confermando come gli ITS siano uno strumento indispensabile per l'attuazione delle politiche di mobilità.

# CAPITOLO 2

## TECNOLOGIE ITS PER MIGLIORARE LA MOBILITA'

### 2.1 Architettura funzionale di un sistema ITS

Gli strumenti ITS sono basati su tre aspetti centrali: acquisizione, elaborazione e diffusione delle informazioni e da un minimo comune denominatore quale è l'integrazione.

I processi di acquisizione dei dati, l'elaborazione e l'integrazione degli stessi e la catena delle informazioni da fornire agli utenti del sistema di trasporto sono il cuore dei sistemi ITS. Tali sistemi risultano fondamentali nella capacità di offrire:

- informazioni real-time sulle correnti e future condizioni del traffico per una rete stradale o autostradale;
- informazioni on-line per programmare un viaggio;
- uno strumento che permetta alle autorità, agli operatori e ai singoli viaggiatori di avere migliori informazioni, più coordinate e prendere così decisioni "intelligenti".

Lo schema generale di funzionamento dei sistemi di trasporto intelligenti è basato sulla struttura ciclica tipica dei sistemi di controllo, costituita da: *sensori* per il monitoraggio del sistema reale, *sistema di elaborazione* per la gestione dei dati ed il calcolo delle azioni da attuare, *attuatori* per la regolazione del sistema reale e l'informazione agli utenti, *sistema di comunicazione* per trasmettere l'informazione da un componente all'altro (Figura 2.1).

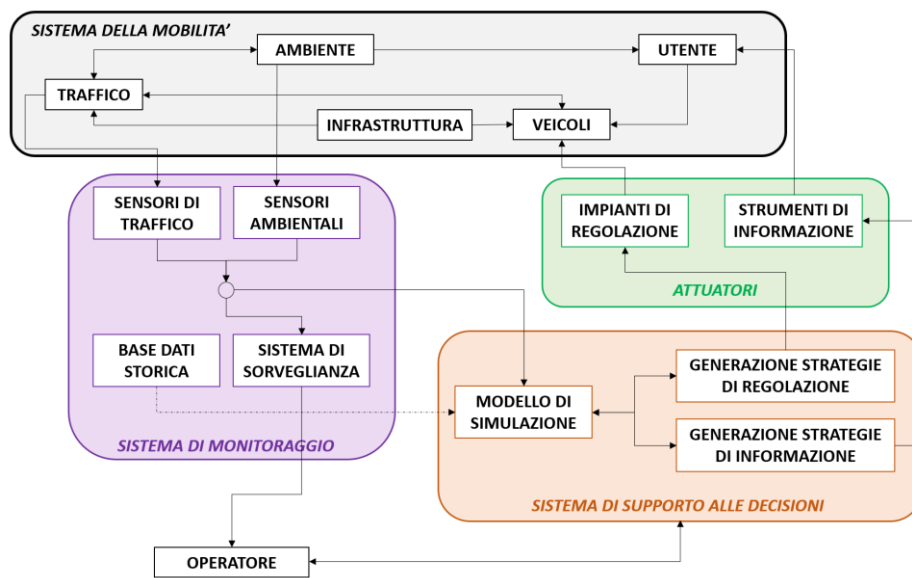


Figura 2.1 Interazioni tra le diverse componenti del sistema ITS

Il sistema reale (veicolo-guidatore-infrastruttura-ambiente) è rappresentato in alto nella figura; il sistema di controllo in basso; l'informazione tra i componenti del sistema viaggia in senso antiorario: i sensori rilevano lo stato del sistema, lo comunicano al sistema di elaborazione che, in maniera automatica o supportando la decisione dell'operatore nel caso di decisioni strategicamente complesse, determina le azioni da applicare al sistema reale mediante la modifica dello stato degli attuatori.

Il sistema di monitoraggio è costituito dai componenti di ingresso delle informazioni (riquadro sulla sinistra della figura) e comprende, oltre ovviamente a sensori di traffico ed ambientali per la raccolta dei dati e al sistema di comunicazione dei dati, un sistema di memorizzazione che ospita la base dati storica ed un sistema di sorveglianza.

Il modulo che contiene l'intelligenza del sistema ITS è il *sistema di supporto alle decisioni* (in genere abbreviato come DSS, *Decision Support System*), che elabora le azioni e le informazioni da trasmettere all'operatore ed agli utenti. L'azione del sistema di controllo sulla realtà si esplica mediante i sistemi di regolazione e di informazione. Le interazioni esistenti tra azioni di regolazione, prestazioni del sistema, informazione e scelta degli utenti richiedono continue retroazioni tra simulazione dello stato del sistema e generazione delle strategie di regolazione e di informazione.

Lo schema proposto è del tutto generale: nelle diverse applicazioni, alcuni componenti o alcune interazioni possono mancare. Alcuni sistemi prevedono esclusivamente il sistema di regolazione (ad esempio, sistemi di regolazione semaforica attuati dal traffico) senza interazione con il sistema di informazione, che potrebbe quindi anche non essere presente. Esistono poi sistemi di regolazione semaforica che prevedono un'elaborazione

esclusivamente locale, così che vengono a mancare il sistema di sorveglianza e la comunicazione diretta con l'operatore. In tal caso non esiste il DSS e non è possibile attuare azioni strategiche a livello di rete. Inoltre, come in tutti i sistemi di controllo, esistono sistemi a circuito aperto, in cui viene attuata una strategia ritenuta ottima, senza prevedere una retroazione basata sulla misura dell'effetto prodotto dall'applicazione di quella strategia. È il caso dei sistemi di regolazione attuata dal traffico, che si limitano a fornire all'utente una informazione sullo stato previsto del sistema, senza prevedere l'effetto che quella informazione può produrre sul sistema stesso. Peraltro, molti sistemi di controllo delle flotte prevedono il solo sistema di monitoraggio e lasciano all'operatore il compito di regolazione per fronteggiare casi di anomalie o altre situazioni non desiderate. Allo stesso modo, va considerato che, per lo stesso ambito applicativo, ciascun componente del sistema può essere realizzato con tecnologie e metodi di funzionamento differenti: si pensi all'informazione sul traffico mediante pannelli a messaggio variabile, terminali di bordo o via Internet.

Si noti anche che lo schema di Figura 2.1, pur essendo prospettato per il livello di applicazione più vasto, cioè di sistema di trasporto a rete, rimane valido anche per singole componenti del sistema, fin anche a livello di controllo del singolo veicolo.

Di seguito verrà fornito un quadro generale delle diverse tipologie di tecnologie ITS e dei principali campi di applicazione, effettuando una prima distinzione tra sistemi per il trasporto persone e sistemi per il trasporto merci.

Infine, in base all'ambito di utilizzo e di orientamento della ricerca, i Sistemi Intelligenti di Trasporto saranno classificati in sistemi infrastructure-based e sistemi vehicle-based.

## 2.2 Classificazione dei campi applicativi degli ITS

La Commissione Europea classifica come ITS i sistemi per (European Commission, 2003):

- la gestione del traffico e della mobilità;
- l'informazione all'utenza;
- la gestione del trasporto pubblico;
- la gestione delle flotte e del trasporto merci;
- il pagamento automatico;
- il controllo avanzato del veicolo per la sicurezza del trasporto;
- la gestione delle emergenze e degli incidenti.

Per quanto riguarda il *trasporto passeggeri*, tra i temi di maggiore interesse si possono citare: la gestione della domanda di trasporto, le informazioni relative al traffico e al viaggio, l'interazione dei sistemi per la gestione del traffico in ambito urbano ed extraurbano, le



problematiche del veicolo come tale e l'assistenza al guidatore, la gestione delle flotte e del trasporto, varie innovazioni nel trasporto pubblico, come il conteggio passeggeri.

Nell'ottica del *trasporto delle merci*, in particolare, l'evoluzione organizzativa nelle operazioni di trasporto e movimentazione mostra due aspetti fondamentali: se da un lato la gestione e la movimentazione dei flussi fisici si avvalgono sia dell'automazione che della preziosa presenza umana, dall'altro si è andato consolidando il ricorso dominante alla telematica nel controllo del processo, nello scambio di informazioni e di documenti. Infatti, nel primo caso, per quanto numerosi mezzi di ausilio alla manodopera e di salvaguardia della sicurezza e qualità siano diffusi presso uffici ed aziende, rimane indispensabile la presenza dell'uomo nelle operazioni di spostamento dei materiali. Nel secondo caso, d'altro verso, è quanto mai evidente l'importanza dell'automazione, la quale si avvale in modo marcato delle telecomunicazioni, dello scambio elettronico di dati e del controllo informatico del processo, quindi di strumenti che tendono ad accrescere l'efficienza del servizio a parità di personale.

In particolare, l'associazione di reti di trasmissione voce e dati, del controllo automatico delle flotte e dello scambio elettronico di dati e documenti, di norma con l'ausilio di sistemi informativi territoriali e di raccolta dati, costituisce un insieme di elementi con elevato potenziale di sviluppo.

La telematica non può costituire, da sola, un unico elemento di competitività e sviluppo dei trasporti moderni, seppure da essa ci si possa attendere molto. Si possono individuare quattro fattori che favoriscono la soluzione dei problemi di trasporto e mobilità: le azioni sulle *infrastrutture*, le azioni attinenti alla *domanda*, il *miglioramento dei veicoli* e la *telematica per i trasporti*. Nessuno di essi costituisce un'alternativa agli altri, né potrebbe essere in grado di risolvere autonomamente i vari problemi del settore. Senza dubbio, però, la telematica può apportare un contributo forte, sia posta in sequenza sia in parallelo agli altri fattori di sviluppo.

Nel seguito vengono introdotti classificazioni e concetti relativi alla telematica applicata nell'ambito del trasporto delle persone e successivamente del trasporto merci.

### **2.2.1 Trasporto persone**

Le moderne tecnologie dell'informazione e della comunicazione hanno abilitato nuove applicazioni ed in futuro modificheranno sensibilmente lo scenario della mobilità motorizzata attraverso l'ausilio di sistemi di informazione, assistenza alla guida, gestione del traffico e dei servizi di trasporto.

Come mostrato in Figura 2.2, nel caso del trasporto delle persone, gli ITS possono essere articolati in cinque principali campi applicativi:

- ATIS (*Advanced Traveller Information Systems*);

- ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*);
- ATMS (*Advanced Traffic Management Systems*);
- ATDM (*Advanced Travel Demand Management Systems*);
- ATPS (*Advanced Public Transportation Systems*).

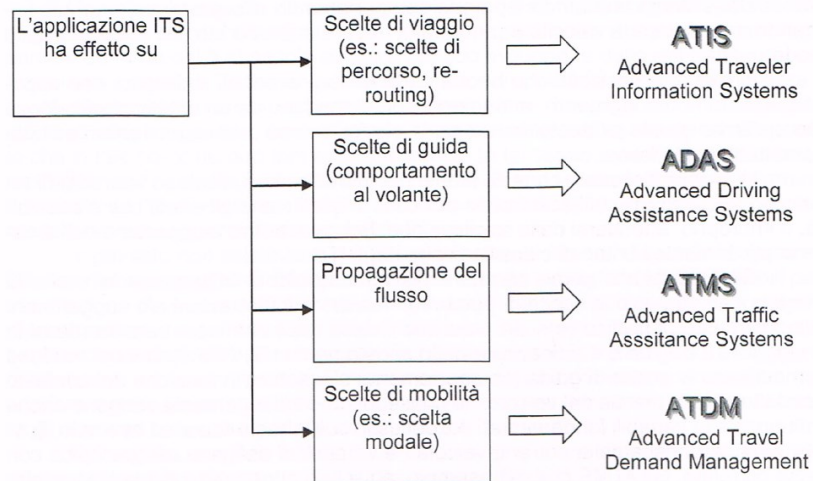


Figura 2.2 Criteri di classificazione dei campi applicativi degli ITS  
(Dalla Chiara et al., 2013)

In questo paragrafo vengono introdotti i primi quattro gruppi relativi all'ambito del trasporto privato. Gli ATIS hanno come carattere distintivo quello di influenzare le scelte di viaggio – ad esempio le scelte di percorso – fornendo informazioni e/o suggerimenti sul contesto di traffico (e sulle prestazioni della rete) che incontreranno durante il viaggio tra origine e destinazione dello spostamento. Gli ADAS, invece, tendono a modificare le scelte di guida (comportamento al volante) in funzione del contesto che influenza la marcia del veicolo; ne consegue che indirettamente vengono anche influenzate le variabili fondamentali del deflusso sull'infrastruttura: ad esempio, flusso, velocità, densità delle correnti veicolari e variabili di deflusso microscopico con esse correlate. Gli ATMS che, ad esempio, agiscono attraverso il controllo semaforico delle intersezioni e delle regole di deflusso/circolazione, influenzano il meccanismo con il quale i deflussi di traffico si propagano da un elemento al successivo di un'infrastruttura stradale e/o tra gli elementi di una rete; essi solo parzialmente ed indirettamente impattano sulle scelte di viaggio. I sistemi ATDM, infine, modificano in maniera molto diretta i comportamenti di mobilità dei passeggeri, tipicamente rispetto a scelte di livello gerarchico superiore a quello della scelta del percorso; gli effetti tipici degli ATDM tendono ad essere in termini di scelta modale, scelta della destinazione, della fascia oraria di spostamento, ecc.

Da un punto di vista applicativo, i sistemi di informazione consentono agli utenti di conoscere non solo le condizioni dell'ambiente circostante, di cui hanno percezione visiva diretta, ma di conoscere anche tempestivamente anche quelle dell'ambiente remoto, permettendo quindi scelte di mobilità informate, consapevoli ed aggiornate; i sistemi di gestione dinamica del traffico consentono di rilevare in maniera automatica, in forma continua, le condizioni di traffico ed ambientali e di attuare le azioni di regolazione necessarie per mantenere per quanto possibile il sistema nello stato di funzionamento ottimale; i sistemi di assistenza alla guida consentono all'utente di disporre di informazioni sull'ambiente circostante e sullo stato del veicolo più accurate e tempestive di quelle che l'utente stesso percepisce direttamente e forniscono ausilio nell'attuazione delle operazioni di guida più appropriate sia per il mantenimento delle condizioni di sicurezza che per un uso efficiente del veicolo in termini di consumo delle risorse energetiche e di emissione delle scorie (sistemi cosiddetti di eco-driving).

### **2.2.2 Trasporto merci**

Il trasporto merci, la multimodalità e la logistica coinvolgono un elevato numero di utenti e di soggetti, di operazioni, di servizi e comportano la necessità di comunicare e di scambiare dati e informazioni il più tempestivamente possibile. Ciò ha portato all'affermarsi di un insieme di esigenze per gli utenti e per gli operatori che devono essere soddisfatte da un sistema telematico in grado di automatizzare i processi informativi.

Il trasporto, la movimentazione delle merci, la relativa attività logistica sono decisi ed organizzati da un certo numero di operatori specializzati (spedizionieri, operatori del trasporto multimodale, corrieri, agenti marittimi, operatori della logistica in genere). Quindi, se per un verso i passeggeri si spostano, nella maggior parte dei casi, di moto proprio e sono consapevoli della propria posizione all'interno delle aree d'interscambio, per altro verso, la merce ha bisogno in qualche modo di essere localizzata – nei terminali, porti, interporti, aeroporti, oltre che nel lungo tragitto, su un modo di trasporto – e spostata.

Si deduce quindi che per un sistema di trasporto soprattutto multimodale ed intermodale di merci senza ostruzioni, ciò che è maggiormente richiesto è:

- la conoscenza, da parte degli operatori, della posizione della merce, le condizioni ed i servizi di trasporto, quindi la disponibilità di informazioni su orari, traffico, spazi disponibili;
- l'automazione nella movimentazione delle merci, per quanto possibile;
- sistemi di pagamento integrati;
- servizi per il monitoraggio remoto, la tele-diagnosi, e l'emergenza (tendenzialmente per le materie pericolose) in grado di operare nei differenti contesti modali.

Sono in corso alcune interessanti applicazioni per derivare – sulla base delle informazioni ricevute da veicoli commerciali ed industriali operanti lungo la rete e utilizzati come sonde – la situazione del traffico. Esistono sistemi avanzati di gestione delle flotte veicolari (AFMS, *Advanced Fleet Management Systems*), finalizzati all’ottimizzazione delle risorse disponibili e comprendenti sia componenti gestionali (ad esempio sistemi di assegnazione dei giri di consegna ad una flotta di veicoli per il trasporto delle merci) sia sistemi tecnologici quali i sistemi di ricarica rapida delle batterie dei veicoli elettrici.

Altre applicazioni recenti a livello europeo riguardano la possibilità di prenotare a distanza un posto ed eventuali servizi per il mezzo pesante, presso le aree di sosta delle stazioni di servizio lungo la rete stradale o in aree intermodali.

## **2.3 Sistemi infrastructure-based e sistemi vehicle-based**

I sistemi ITS possono essere classificati in due famiglie in base all’ambito di utilizzo e di orientamento della ricerca:

- 1) Sistemi Infrastructure-based: sono sistemi di informazione in tempo reale che forniscono aggiornamenti sullo stato della rete informando i guidatori o gli operatori di una società di trasporto su eventuali congestioni, incidenti o eventuali anomalie registrate sulla rete. In questo modo gli utenti saranno indotti ad evitare le zone congestionate, indirizzandosi verso un itinerario più conveniente mentre gli operatori di una società di trasporto cercheranno di gestire nella maniera più efficiente i flussi sulla rete.
- 2) Sistemi Vehicle-based: sono sistemi che supportano i guidatori a bordo dell’auto per garantire loro una maggiore sicurezza. Questi sono sistemi di controllo della distanza veicolare, sistemi di controllo della velocità, ed ulteriori sistemi che aiutano il guidatore in caso di emergenza.

Di seguito è riportata una descrizione delle due famiglie di sistemi.

### **2.3.1 Sistemi infrastructure-based**

In questa famiglia rientrano i sistemi basati sulla gestione delle arterie stradali, i sistemi per la gestione del traffico e per l’accesso a corsie riservate, i sistemi di gestione degli incidenti e i sistemi per il miglioramento del trasporto merci. Si riporta per ciascuno di essi una breve descrizione.

### **Arterial Management Systems**

Questi sistemi, impiegando rivelatori di traffico, segnali di traffico e diversi mezzi di comunicazione per informare i viaggiatori, controllano e regolano il transito dei veicoli lungo le arterie stradali.

Esistono dei segnali di priorità di transito per il trasporto pubblico, in grado di agevolare il viaggio dei mezzi pubblici, migliorandone prestazioni e puntualità. I segnali di precedenza per i veicoli di soccorso aumentano la sicurezza di chi è deputato a rispondere alle chiamate di emergenza, riducendo la probabilità di inconvenienti durante le operazioni di soccorso.

I segnali semaforici additivi che coordinano il controllo dei semafori, adattando il ciclo delle fasi semaforiche in base alle reali condizioni di traffico. Esistono dei sistemi che, nelle ore di punta, consentono di variare il numero di corsie in base ai flussi di traffico e dei sistemi che, basandosi su tecnologie di comunicazione dinamica veicolo-strada, possono imporre restrizione alla marcia di alcuni veicoli per i trasporti eccezionali o che trasportano merci pericolose solo su alcune corsie di marcia.

Si hanno poi i rivelatori pedonali e segnali di pericolo specializzati per le biciclette che possono migliorare la sicurezza negli incroci stradali.

Tutte queste informazioni vengono acquisite da un centro di monitoraggio e gestione del traffico e condivise con i guidatori attraverso i Pannelli a Messaggio Variabile (PMV) o canali radio tematici.

### **Freeway Management Systems**

Questi sistemi consentono una migliore gestione del traffico mediante l'utilizzo di rilevatori di traffico, sistemi di videosorveglianza e altri mezzi di controllo, limitando altresì l'accesso del traffico all'infrastruttura mediante la riduzione del numero di corsie disponibili e imponendo limiti di velocità variabili.

Mediante l'uso di contatori d'ingresso sulle rampe di accesso, sarà infatti possibile ottimizzare sia le velocità di viaggio che i tempi di attesa per l'accesso all'infrastruttura stessa. La gestione delle corsie è utile ad indirizzare la capacità della strada in questione e promuovere l'uso di veicoli con elevati coefficienti di occupazione.

### **Incident Management Systems**

I sistemi di gestione degli incidenti determinano una riduzione del tempo necessario per rilevare un incidente e coordinano le operazioni a seguito di quest'ultimo riducendo i tempi per l'arrivo dei soccorsi e per lo sgombero dell'area interessata e la conseguente riapertura delle corsie di viaggio.

Per rilevare tempestivamente gli incidenti si utilizzano un insieme di tecnologie quali telecamere, sistemi fotografici e acustici, segnali di richiesta di soccorso e di localizzazione

veicolare automatizzata che possono aiutare a gestire più velocemente tutte le operazioni necessarie compresa la valutazione dei sinistri.

### **Crash prevention and safety**

I sistemi di prevenzione degli incidenti fanno uso di sensori tecnologici e segnali di avvertimento attivo quali lampeggianti e PMV che preannunciano ai conducenti la presenza di curve o incroci pericolosi, di passaggi a livello ferroviari o avvicinamento di mezzi pesanti ed altre condizioni di pericolo.

Inoltre, esistono dei sistemi di sicurezza pedonali per aiutare a proteggere i pedoni, che attivano automaticamente un'illuminazione nel fondo stradale in modo da allertare gli automobilisti in arrivo. Sistemi di avvertimento del passaggio di animali utilizzano radar per rilevarne la presenza e allertano i conducenti mediante appositi lampeggiatori.

### **Traveller information e information management**

I sistemi Traveller information sono quei sistemi informativi dedicati a chi viaggia che, attraverso l'utilizzo di tecnologie quali Internet, numeri telefonici dedicati, canali televisivi e radiofonici, consentono ai guidatori di prendere decisioni appropriate in merito ad orari di partenza, percorsi e tappe di viaggio.

I sistemi information management, invece, utilizzano i dati storici raccolti mediante i sistemi ITS per poi valutare le prestazioni di un sistema di trasporto. Inoltre, i sistemi di gestione delle informazioni possono assistere nella pianificazione dei trasporti e nell'attività di gestione della sicurezza.

### **Road weather management**

Le avverse condizioni meteorologiche possono costituire una significativa minaccia per il transito dei veicoli in sicurezza. In questo ambito trovano applicazione i sistemi ITS basati sullo sviluppo di sistemi informativi meteorologici stradali (Road Weather Information Systems – RWIS) e di tecnologie volte alla manutenzione invernale delle infrastrutture. Questi sistemi facilitano il monitoraggio e l'attività previsionale delle condizioni stradali ed atmosferiche, diffondendo informazioni relative alle condizioni meteo e aumentando la sicurezza imponendo limiti di velocità variabili.

### **Roadway Operations and maintenance**

Queste applicazioni ITS si occupano della gestione integrata della manutenzione del manto stradale e della sicurezza dei cantieri stradali. Tali sistemi controllano, analizzano e diffondono dati inerenti lo stato delle strade e l'eventuale stato di manutenzione in atto. La diffusione delle informazioni avviene, come nel caso dei sistemi di segnalazione di incidenti, mediante l'uso di PMV. Tali pannelli possono essere aggiunti temporaneamente nelle zone

interessate da lavori o utilizzati per informazioni temporanee sui cambiamenti di velocità e ritardi, e sui cambiamenti di configurazione delle corsie.

### **Electronic Payment Systems**

I sistemi di pagamento elettronici impiegano varie tecnologie per velocizzare il pagamento di pedaggi e tariffe di transito.

La raccolta elettronica dei pedaggi rappresenta un'efficace applicazione ITS in quanto determina una riduzione dei tempi d'attesa in coda, uno snellimento della circolazione, una riduzione del consumo di combustibile con la conseguente riduzione delle emissioni del veicolo in sosta.

### **Commercial Vehicle Operations**

Esistono applicazioni ITS specifiche per le operazioni relative a veicoli commerciali e progettate per aumentare la comunicazione fra addetti al trasporto e i rispettivi centri direzionali, in particolare durante trasporti transnazionali. Questi sistemi abbassano le spese operative attraverso il potenziamento dell'efficienza e migliorano la sicurezza degli autotrasportatori.

Le applicazioni gestionali sulle credenziali di viaggio consentono, inoltre, ad agenzie e lavoratori del settore un corposo risparmio di carteggio burocratico. Transponder presenti sul mezzo possono comunicare con stazioni di peso e checkpoint doganali riducendo così la congestione nelle stazioni di ispezione ed i tempi di viaggio.

### **Intermodal Freight**

I sistemi ITS possono migliorare l'efficienza e la sicurezza del trasporto delle merci. Appositi sistemi di rilevazione controllano e forniscono informazioni sullo stato del carico per assicurare che i container rimangano chiusi mentre sono in viaggio. Si possono in questo modo controllare posizione e corrispondenza dei container in tempo reale e migliorare l'efficienza delle operazioni di carico/scarico e di movimentazione.

Attivando etichette provviste di chip (detti tag) si è in grado di tracciare il percorso dei container all'interno del terminal e di automatizzarne la movimentazione. Presso gli scali internazionali sono presenti sistemi ITS che consentono transazioni automatizzate, riducendo così i ritardi associati alla dogana.

### **2.3.2 Sistemi vehicle-based**

In questa famiglia rientrano i sistemi di avvertimento anticollisione e rilevamento degli ostacoli, di assistenza alla guida e di notifica di collisione. Si riporta anche per essi una breve descrizione.

#### **Collision Warning Systems**

Al fine di migliorare le condizioni di sicurezza dei veicoli, stanno diffondendosi sistemi di avvertimento anticollisione, sistemi di rilevamento degli ostacoli, i sistemi di avvertimento di partenza, sistemi di avvertimento di cambio corsia.

Questi sistemi utilizzano una varietà di sensori per controllare le zone adiacenti al veicolo e allertare il conducente in caso di condizioni che potrebbero condurre a una collisione. Qualora il conducente non usi correttamente i freni in una situazione critica, radar a microonde e telecamere montate a bordo del veicolo, inviano un segnale di pericolo a dei sistemi attuatori che assumono autonomamente il controllo e rallentano il veicolo nel tentativo di evitare l'urto.

I sistemi di rilevamento degli ostacoli utilizzano sensori montati sul veicolo per rilevare ostruzioni, la presenza di altri veicoli, detriti o animali lungo il percorso.

I sistemi di avvertimento di partenza sono utilizzati per allertare gli automobilisti, qualora risultino assonnati e trattenerli dall'intraprendere un viaggio.

Sistemi di avvertimento del cambio di corsia (Lane-change) vengono usati per allertare i conducenti della presenza di altri veicoli o ostruzioni nelle corsie adiacenti, nel caso in cui il conducente voglia cambiare corsia.

#### **Driver Assistance Systems**

Nell'ambito dell'assistenza ai guidatori esistono sistemi di visione presenti sui veicoli che migliorano la qualità della guida in condizioni visive ridotte, in caso di guida notturna, di illuminazione inadeguata, nebbia, neve o altro. Il controllo di crociera intelligente (Intelligent Cruise Control - ICC), il controllo di velocità e l'assistenza di guida e sterzo, aiutano la guida di chi viaggia.

Nel caso di incidente, i registratori di sicurezza possono agire come una "scatola nera" e registrare i dati relativi alle prestazioni e ad altre informazioni, rilevate da videocamere o sensori radar, per migliorare a posteriori la comprensione dell'incidente.



### **Collision Notification Systems**

I sistemi di notifica di collisione sono stati progettati per rilevare e riferire posizione e gravità dei sinistri ad organizzazioni preposte al coordinamento delle azioni di soccorso. Questi sistemi possono essere attivati manualmente o in maniera automatica.

I sistemi di notifica di collisione utilizzano appositi sensori unitamente alla tecnologia GPS ed a sistemi di comunicazioni wireless per fornire a call-center pubblici e privati informazioni sulla posizione e, in alcuni casi, sul numero dei passeggeri feriti e sulla natura delle loro ferite.

Sono attualmente disponibili diversi sistemi di questo tipo come optional su vetture di lusso o installati su veicoli come prodotti fuori mercato.

## **2.4 Esempi di applicazioni dei sistemi ITS nel trasporto pubblico e privato**

Nel trasporto privato i sistemi intelligenti di trasporto trovano un duplice impiego, da una parte essi sono strumenti di supporto decisionale per ottimizzare le scelte di percorso, dall'altra, grazie a dei sistemi di controllo del veicolo sono uno strumento di sicurezza per il guidatore mentre è in viaggio.

Per quel che riguarda il primo aspetto si è già detto che i sistemi intelligenti di trasporto danno all'automobilista una serie di consigli e di informazioni che rendono il viaggio più confortevole, più efficiente e meno aleatorio. I consigli agli utenti si riferiscono alla diffusione dei dati di informazione riguardo a situazioni di congestione, a condizioni atmosferiche avverse e ad incidenti. I sistemi ITS d'altronde non solo forniscono una serie di informazioni all'automobilista, tenendolo continuamente aggiornato, ma sono anche un sistema di supporto alla guida per garantirgli sicurezza, mediante utili applicazioni in termini di controllo adattativo della velocità di crociera, del controllo autonomo del veicolo, di sistemi di avviso per pericolo collisione, di sistemi di avviso per manovre rischiose ed indicazioni agli incroci pericolosi, di controllo delle condizioni e dell'efficienza dell'automobilista e del veicolo.

Nel settore del trasporto pubblico i moderni sistemi intelligenti di trasporto hanno contribuito a migliorare il coordinamento della rete di trasporto, l'informazione all'utenza e l'acquisizione dei dati di servizio ai fini di una migliore utilizzazione dei mezzi pubblici e della predisposizione di adeguati piani di trasporto. Il coordinamento della rete dei servizi è la diretta conseguenza dell'adozione del sistema di rilevamento della posizione dei mezzi e della loro rappresentazione grafica per segnalare scostamenti o irregolarità. L'informazione all'utenza è lo strumento ideale per ristabilire quel colloquio tra coloro che sono in attesa alle

fermate oppure a bordo dei mezzi e l'azienda di trasporto. L'acquisizione dei dati storici del servizio rappresenta una fonte preziosa a cui attingere al momento di programmare orari ed itinerari dei nuovi programmi di esercizio.

Per mantenere sotto generale controllo l'intera rete dei servizi viene ad essere molto importante fornirsi di sistemi informatici adeguati. Tramite l'utilizzo di sistemi ITS una rete di servizi è sottoposta a continuo monitoraggio; i dati rilevati vengono inviati ad un centro operativo attivo nel coordinamento dell'intero servizio di trasporto. Questo continuo monitoraggio e controllo del sistema di trasporto e della rete risulta fondamentale per aumentare la competitività dell'azienda e per fornire un elevato livello di servizio all'utenza.

L'utilizzo di sistemi ITS permette, tramite paline elettroniche ad esempio, di fornire messaggi ai passeggeri in attesa che, in tal modo, sono informati di quanto sta accadendo sulla rete (interruzioni, deviazioni) consentendo loro di adeguare le proprie decisioni agli eventi. I sistemi intelligenti di trasporto consentono inoltre ai gestori di un'azienda di trasporto di conoscere in maniera tempestiva e aggiornata la qualità dei servizi offerti. Tutto questo rende il servizio di trasporto pubblico più efficiente ed incrementa il livello di soddisfazione percepito dagli utenti che, di conseguenza, sono incoraggiati ad utilizzarlo, preferendolo al servizio di trasporto privato.

Di seguito sono riportati i casi delle principali applicazioni dei sistemi ITS nell'ambito sia del trasporto pubblico che del trasporto privato, in grado di al fine migliorare l'efficienza del sistema dei trasporti, ridurre il fenomeno della congestione stradale oltre che delle emissioni inquinanti e aumentare la sicurezza e il confort.

### **2.4.1 Sistemi per la navigazione e l'informazione in viaggio**

Informazione in viaggio e navigazione sono funzioni assai articolate e complesse. Una distinzione importante è quella fra navigazione "statica" e "dinamica".

Per navigatore statico si intende un navigatore tipicamente "on board" che consente di avere il percorso fra un punto (indirizzo) origine e una destinazione sulla base di valori fissi e invariante delle impedenze dei singoli archi della rete stradale (espressa sotto forma di grafo della mappa stradale). I costi sulla base dei quali si calcola la convenienza di un percorso rispetto ad un altro (detti anche "impedenze"), sono generalmente la lunghezza o il tempo di viaggio ritenuto "medio" sui diversi archi stradali e sono valori fissi costanti definiti in funzione del contesto e delle caratteristiche fisico-funzionali delle strade stesse.

Il calcolo del percorso viene effettuato avendo la possibilità di scegliere se si vuole il percorso più veloce, più corto, solo autostradale, solo per i mezzi pesanti, (che corrisponde a pesare in modo opportuno un costo "generalizzato", o operare su un sottoinsieme di archi della rete). In ogni caso il risultato è indipendente dal momento in cui si fa la richiesta di

percorso. Il percorso può essere programmato tenendo conto di tappe intermedie o impostando profili particolari di velocità, quali per esempio, autovetture, autocarri o pedoni. Se lo si desidera, durante il viaggio il navigatore può emettere avvisi grafici o acustici su eventuali limiti di velocità presenti e generalmente fornisce l'ora di arrivo prevista, la distanza e il tempo di viaggio restante.

La definizione di navigatore dinamico è invece un po' più complessa. Se si guarda l'attuale offerta di navigatori sia di primo impianto che installati dopo l'inserimento sul mercato, sotto la voce "dinamici" si trovano per lo più quelli per i quali "navigazione dinamica" significa che le informazioni sul traffico vengono considerate nell'elaborazione per la pianificazione del percorso. Il navigatore, non appena riceve informazioni relative a code o ingorghi, calcola autonomamente un'eventuale deviazione dal percorso originario.

Per sintetizzare e rendere più facilmente leggibile l'articolazione dei navigatori si introduce una macro classificazione in relazione agli elementi che maggiormente caratterizzano non tanto i navigatori quanto le loro logiche di funzionamento. Si hanno pertanto 4 "generazioni" di navigatori:

- 1G: navigatori statici che utilizzano le impedenze delle mappe (dipendenti dalle caratteristiche geometriche e funzionali delle strade) e reagiscono agli eventi (incidenti) indicando percorsi alternativi;
- 2G: navigatori dinamici che utilizzano dati di traffico in tempo reale considerando le impedenze "attuali" (instantaneous travel time);
- 3G: navigatori dinamici che utilizzano dati di traffico "time dependent" calcolando il percorso considerando l'evoluzione nel tempo nello spazio della posizione del veicolo;
- 4G: navigatori dinamici che oltre a considerare i dati "time dependent" considerano esplicitamente la presenza di altri veicoli che vogliono ottimizzare il loro percorso.

In campo applicativo, attraverso questi sistemi di pianificazione dei percorsi, gli utenti vengono messi a conoscenza riguardo a costi e pedaggi, ricevono consigli per la schedulazione dei tratti da percorrere, ricevono stime riguardo ai tempi di ritardo a causa di situazioni di congestione, sono aiutati per la scelta del percorso da compiere e l'orario di partenza da scegliere.

Attraverso l'acquisizione di dati real-time e l'istantanea diffusione di messaggi di informazione, l'automobilista è continuamente a conoscenza delle effettive condizioni della rete ed è quindi in grado di prendere decisioni più intelligenti e sicure. Infatti, grazie alla diffusione di informazioni sulla viabilità e sulle condizioni di traffico della rete, utilizzando i servizi di infomobilità telematica, gli utenti compiono scelte ottimali in merito alle proprie esigenze di spostamento. Questo sistema di instradamento che fornisce consigli ed istruzioni agli automobilisti riguardo alla scelta migliore del percorso da compiere viene chiamato Route Guidance System.

## 2.4.2 Sistemi per la gestione e il controllo del traffico

Fanno parte di questa tipologia tutti quei sistemi, che grazie a logiche di controllo più o meno complesse, regolano la circolazione stradale sia in ambito urbano che in ambito extraurbano ed autostradale.

### *Sistemi di controllo del traffico urbano*

I sistemi di controllo del traffico urbano (Urban Traffic Control - UTC) sono sistemi che regolano gli impianti semaforici, agendo direttamente sui dispositivi di attuazione, per coordinare tra di loro le intersezioni adiacenti e rendere il traffico maggiormente scorrevole. Esistono differenti tipologie di sistemi UTC:

- Rete di semafori a piani fissi coordinati: è il più semplice metodo di gestione e regolazione del traffico urbano. Dal punto di vista hardware, si interviene solamente sui regolatori semaforici, all'interno dei quali vengono impostate delle politiche di gestione del traffico predefinite; tali politiche sono invariante e il sistema non è in grado di reagire né a situazioni eccezionali, come ad esempio improvvise congestioni dovute ad incidente, né di adeguarsi alle lente evoluzioni del traffico. Solitamente vengono impostati a calendario, dei piani semaforici che cambiano nelle ore di punta, nelle ore di morbida e di notte.
- Sistema UTC a selezione di piano: gestiscono le fasi semaforiche in base a piani predeterminati; rispetto alle reti di semafori illustrate precedentemente, viene realizzato un sistema di centralizzazione semaforica che utilizza sensori per la misura istantanea del traffico nell'area gestita; nel caso in cui i dati raccolti dai sensori seguano un profilo predeterminato, chiamato scenario di traffico, vengono attuati i piani corrispondenti; l'impianto semaforico attua il ciclo semaforico più adatto alla situazione del momento.
- Sistemi UTC attuati dal traffico: consentono la micro-regolazione dell'impianto semaforico per gestire situazioni particolari ad alta variabilità di domanda, come ad esempio movimenti dedicati al trasporto pubblico, svolte con molti conflitti e così via. In questi casi il regolatore semaforico riduce attua o prolunga le fasi semaforiche in base alle necessità contingenti. Tali condizioni sono rilevate attraverso l'uso di sensori di traffico.
- Sistemi UTC adattativi: sono i sistemi più completi, ma anche i più efficaci, per la gestione del traffico urbano. Tale tipologia di sistema utilizza algoritmi adattativi per definire in maniera dinamica (nell'ordine di pochi secondi) la miglior politica di gestione semaforica, in base ai dati di traffico rilevati dai sensori di incrocio, alle decisioni e ai dati ricevuti dalle intersezioni circostanti e alle politiche impostate dal centro di gestione della mobilità. Tali sistemi sono normalmente dotati di algoritmi

predittivi che consentono di prevenire situazioni di traffico critiche. Gli algoritmi di ottimizzazione sono basati su modelli di traffico: in altre parole è insita nel sistema la conoscenza della rete; agendo sui parametri del modello è possibile modificare gli obiettivi dell'ottimizzazione del traffico (ad esempio privilegiare un flusso, ridurre il numero di fermate ai veicoli privati, privilegiare il trasporto pubblico e così via). Questi sistemi sono gli unici che riescono ad assegnare la priorità ai mezzi pubblici senza penalizzare il traffico privato.

#### Indirizzamento parcheggi

Il sistema, come indica il nome, fornisce indicazioni circa la disponibilità di posti nei parcheggi in struttura o controllati e ne indica la direzione per raggiungerli. Esso consente di ridurre i tempi di ricerca del parcheggio, con conseguente riduzione di consumi ed emissioni.

#### Sistemi di controllo del traffico extraurbano ed autostradale

- Sistemi di informazione e indirizzamento collettivo: hanno l'obiettivo di far conoscere al maggior numero di conducenti possibile informazioni diverse attraverso l'uso di pannelli a messaggio variabile. Le informazioni possono riguardare eventuali situazioni di congestione ed i relativi consigli di re-routing o tempi di viaggio su particolari tratte autostradali. Tale tipo di sistema si adatta sia a scenari urbani che extraurbani.
- Section control e limite di velocità variabile: tale sistema consente di modificare il limite massimo di velocità su tratte autostradali in base alle reali condizioni del traffico; inoltre il sistema può essere calibrato anche con algoritmi che tengano in considerazione parametri di efficienza energetica oltre che di efficienza dell'infrastruttura stradale.
- Attivazione della corsia di emergenza per congestione: il sistema comanda una serie di pannelli a messaggio variabile posti al di sopra della corsia di emergenza delle Autostrade; con l'attivazione di una luce verde il sistema consente ai veicoli di circolare su tale corsia. Il sistema consente quindi ai veicoli di transitare sulla corsia di emergenza nei momenti di congestione delle corsie di marcia tradizionali.

### **2.4.3 Sistemi per la gestione flotte di veicoli di trasporto pubblico**

#### Sistema di pianificazione, monitoraggio (AVM) del servizio di trasporto pubblico

Il sistema consente di pianificare il servizio ottimizzando l'uso delle risorse (veicoli ed autisti), monitorare e regolare il servizio in tempo reale e permettere a consuntivo il confronto con il servizio pianificato.

Così come la fase di pianificazione consente di ottimizzare l'utilizzo delle risorse (veicoli e personale) per la gestione dei servizi, i sistemi AVM consentono il monitoraggio, istante per istante, dell'utilizzo delle risorse, e gli interventi necessari a contrastare eventuali scostamenti dall'ottimo di sistema. Il sistema regolarizza i passaggi dei mezzi pubblici e gli intertempi tra i veicoli che svolgono il servizio; è noto infatti che l'irregolarità del servizio causa una diminuzione della capacità di trasporto. Il sistema consente anche, a parità di servizio erogato, di ridurre il numero di veicoli della flotta e conseguentemente le emissioni. Inoltre, migliorando la regolarità del servizio e l'informazione agli utenti, si rende il servizio stesso più appetibile alla clientela, che potrebbe optare per uno scambio modale, riducendo quindi le emissioni da traffico privato. Il sistema è integrabile anche con i sistemi UTC, per consentire ai mezzi pubblici di ottenere la priorità alle intersezioni semaforizzate.

Tali sistemi sono piuttosto diffusi nelle città di grandi dimensioni; la diffusione in piccole e medie città trova resistenza da parte delle aziende di trasporto a causa della necessità di personale qualificato per la gestione del sistema stesso.

#### *Sistema di bigliettazione elettronica integrata*

Il sistema consente di utilizzare un unico titolo di viaggio per il pagamento di servizi di trasporto (bus, treno, metro...), o altri servizi quali parcheggi, car sharing, bike sharing e così via. I sistemi di bigliettazione elettronica si stanno diffondendo grazie alla maturità delle tecnologie di supporto; tuttavia nella maggior parte dei casi si tratta di sistemi di bigliettazione elettronici per un singolo servizio (ad esempio trasporto pubblico), senza possibilità di integrazione con altre tipologie di servizio di mobilità. Le soluzioni integrate potrebbero favorire la penetrazione su larga scala di tale tipologia di sistema, con notevoli benefici per i gestori dei servizi.

#### *Sistema di informazione all'utenza del trasporto pubblico*

I sistemi di informazione all'utenza utilizzano come fonte dati il sistema di gestione e monitoraggio della flotta di mezzi pubblici; tali dati consentono all'utente di conoscere in tempo reale i tempi di passaggio dei mezzi pubblici delle varie linee. Il sistema rende il trasporto pubblico più appetibile alla clientela, favorendo lo shift modale.

Inoltre, fanno parte di questa tipologia di sistemi i sistemi che indirizzano gli utenti ai parcheggi di scambio modale.

## 2.4.4 Sistemi per influenzare il comportamento dei viaggiatori

I sistemi per influenzare in modo positivo il comportamento dei viaggiatori sono sostanzialmente strumenti che indirizzano il viaggiatore a mantenere comportamenti il più possibile eco-friendly. I sistemi possono dare raccomandazioni sullo stile di guida da mantenere (evitare accelerazioni brusche, mantenere una velocità costante) che possono essere veicolate sia attraverso siti internet, sia attraverso la strumentazione di bordo. Oltre agli strumenti tecnologici vi sono anche strumenti politici, appoggiati da tecnologie, che possono contribuire al cambiamento dei comportamenti dell'utente: si tratta di politiche di car sharing o di car pooling.

### Eco-Driving

Con la sigla Eco-Driving si identifica una serie abbastanza eterogenea di "sistemi", "dispositivi", "protocolli", ecc. molto diverse tra loro accomunati solo ed esclusivamente dall'obiettivo di aiutare il guidatore a ridurre i consumi e conseguentemente le emissioni di CO<sub>2</sub>.

Iniziative nel campo dell'Eco-Driving, a livello internazionale, si possono classificare in quattro categorie:

- campagne di sensibilizzazione
- training su simulatori
- training su strada
- tecnologia on-board.

Le prime tre sono in genere appannaggio di istituzioni e organizzazioni specifiche e sono sostanzialmente delle iniziative di formazione/educazione, mentre l'ultima è quella messa a disposizione dalla maggior parte delle case automobilistiche.

### Car sharing

I viaggiatori possono mantenere comportamenti eco-friendly, dipendenti solo in parte da sistemi ITS, più legati ad un'accorta politica dei trasporti: le pubbliche amministrazioni possono spingere sul car-pooling (utilizzo della stessa vettura da parte di persone che effettuano lo stesso percorso giornalmente) o sul car-sharing (ovvero il sistema per cui utenti diversi utilizzano a diverse ore della giornata la stessa vettura di proprietà di un'agenzia di car-sharing).

Il car sharing è molto utilizzato in aree metropolitane, quali ad esempio Roma, Torino, Milano e recentemente anche a Catania.

## 2.4.5 Sistemi per la gestione degli accessi e della domanda

I sistemi di gestione degli accessi e di controllo della domanda sono sistemi che vengono utilizzati per limitare gli accessi in alcune aree delle città. I sistemi ITS consentono di implementare le politiche di accesso definite dalla municipalità, attraverso l'uso di telecamere con riconoscimento targhe, oppure attraverso l'uso di sistemi di pagamento elettronici.

### Controllo accessi alla ZTL

Il controllo accessi in Zona a Traffico Limitato (ZTL) consiste nel consentire l'accesso a determinate zone della città a determinate tipologie di veicoli; solitamente viene negato l'accesso a tutti i veicoli privati, esclusi i residenti. Inoltre, sono possibili differenti politiche di gestione della Zona a Traffico Limitato: solo in alcune fasce orarie della giornata, solo per alcune categorie di omologazione dei veicoli e così via.

I sistemi ITS sono di supporto alle politiche di controllo accessi, grazie a sistemi di telecamere (i varchi), che riprendono i veicoli transitanti leggendone la targa; nel caso che la targa del veicolo non sia in "lista bianca" (ovvero non autorizzato a circolare) la polizia locale provvederà ad elevare contravvenzione.

### Cordon pricing/Congestion pricing

Il cordon (o congestion) pricing è una politica di controllo accessi che permette alla municipalità di far pagare un pedaggio ai veicoli che entrano in una determinata area della città; l'importo dovuto può variare a seconda della classe di omologazione del veicolo.

### Electronic tolling

I sistemi di tolling elettronico (ovvero di pagamento di pedaggi in modo elettronico) sono utilizzati per lo più in ambito autostradale. I sistemi attuali di electronic tolling sono basati su dispositivi a bordo veicolo che, dialogando con l'infrastruttura di terra, segnalano il passaggio del veicolo e di conseguenza attivano il pagamento del pedaggio.

Il sistema adottato da Autostrade per l'Italia è il Telepass.

## 2.4.6 Sistemi per la gestione di flotte e merci e della logistica

### Servizi di gestione flotte di veicoli commerciali

I sistemi di gestione delle flotte consentono di monitorare i veicoli commerciali e di pianificarne le missioni. La pianificazione delle missioni mira soprattutto alla riduzione dei costi interni dell'azienda di trasporto, quali ad esempio i consumi di carburante. Inoltre, con



un'accorta politica di gestione dei rientri (o dei vuoti nel caso in cui si trasportino container), si evita che veicoli altamente inquinanti circolino senza trasportare merce.

Il servizio di gestione flotte delle merci pericolose consente alle autorità di tracciare, istante per istante, i veicoli che trasportano merci pericolose (infiammabili, esplosive, tossiche); tali sistemi consentono inoltre di pianificare i percorsi a minor rischio per tali tipologie di merci, per evitare che attraversino zone sensibili (ad esempio un veicolo che trasporta sostanze tossiche non dovrebbe attraversare i centri abitati). Inoltre il sistema, tracciando i veicoli, consente di incrementare la sicurezza: si può essere avvisati di un eventuale furto di un mezzo di questo tipo che può essere utilizzato per eventuali attentati.

#### Gestione logistica urbana

La gestione delle aree logistiche urbane consente di controllare il movimento di veicoli altamente inquinanti all'interno delle aree cittadine; lo scopo è quello di evitare il sovraffollamento delle aree di carico/scarico attraverso politiche di prenotazione degli stalli di sosta.

### **2.4.7 Enforcement**

I sistemi di enforcement servono per il rilevamento delle infrazioni del codice della strada. I tre sistemi di questo tipo più diffusi sono il Safety Tutor, l'Autovelox ed il cosiddetto T-red, per la rilevazione degli attraversamenti con il semaforo rosso.

Il mercato di tale tipologia di sistema è in espansione, perché consente di aumentare notevolmente il livello di sicurezza delle strade.

## **2.5 Principali Best Practices nel panorama nazionale**

Per affrontare le sfide legate al continuo aumento della domanda di mobilità, anche in Italia, come in altri paesi europei, il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, ha indicato per l'Italia la necessità di pensare i trasporti in un modo nuovo, ossia con un approccio di sistema, nella quale informazione, gestione e controllo operano in sinergia, ottimizzando l'uso delle infrastrutture, dei veicoli e delle piattaforme logistiche, in un'ottica ottimale.

Gli ITS in Italia, rappresentano, in realtà, un settore attivo sin dagli anni Ottanta, che ha avuto notevole sviluppo a partire dal decennio successivo, in parallelo con la crescita del settore negli altri paesi maggiormente industrializzati. Amministrazioni centrali e locali, aziende, istituti di ricerca, università italiane e gestori pubblici e privati della rete, hanno

preso parte a tutti i Programmi Quadro di ricerca e sviluppo della commissione europea ottenendo risultati significativi [13].

Sistemi ITS per la gestione del traffico e della mobilità, sono in esercizio in numerose città italiane, tra cui Roma, Torino, Milano, Firenze, Bologna, Genova, Perugia, Napoli, Brescia, Salerno, Catania. Inoltre, quasi l'50% delle Aziende di Trasporto Pubblico Locale sono dotate di sistemi di localizzazione e di monitoraggio delle flotte, volti al miglioramento del servizio offerto.

A seguire sono riportate alcune delle Principali Best Practices presenti in Italia: il sistema per la gestione della mobilità di Torino, noto come sistema 5T (Tecnologie Telematiche per i Trasporti e il Traffico a Torino), il Sistema integrato di gestione del traffico e della mobilità della città di Roma e il sistema Safety Tutor.

### 2.5.1 La centrale della mobilità di Torino

La città di Torino rappresenta una best practice a livello nazionale ed europeo nell'utilizzo degli ITS per la gestione della mobilità e dell'infomobilità. Torino ha realizzato una Centrale della Mobilità per la gestione di sistemi e servizi per la smart mobility, chiamata "Sistema 5T" (Figura 2.3).

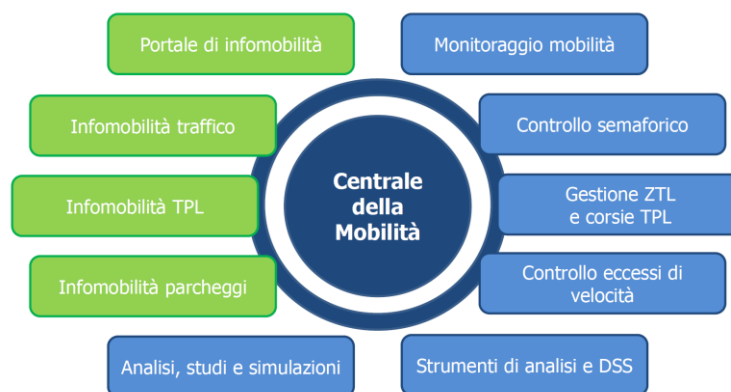


Figura 2.3 La centrale di mobilità integrata di Torino  
(Antoniola, 2016)

Il Sistema 5T (Tecnologie Telematiche per i Trasporti e il Traffico a Torino) è uno dei più importanti sistemi europei di gestione della mobilità basati sugli ITS. Il Progetto ha preso il via nel 1992 e attualmente il Sistema 5T è composto da 7 Sottosistemi quali:

1. Il Supervisore Cittadino, che garantisce l'integrazione di tutti i sottosistemi al fine di generare il miglior servizio alla mobilità tutelando l'ambiente. Il sistema agisce

rilevando ogni 5 minuti l'andamento del traffico, prevedendo in tal modo per ogni ora la mobilità, controllando i livelli di inquinamento e formulando la strategia più opportuna per la protezione dell'ambiente (Figura 2.4).

2. Il sottosistema di gestione del Trasporto Pubblico, che assicura la regolarità e la velocità del servizio di trasporto pubblico attraverso il monitoraggio dei veicoli su strada, e l'informazione dell'utenza alle fermate. In particolare, tale sistema opera mediante l'ausilio di 353 unità di visualizzazione degli arrivi in fermata (VIA) e di 500 unità di annuncio della prossima fermata installati a bordo dei mezzi (Figura 2.4).
3. Il sottosistema di controllo del Traffico UTC (Urban Traffic Control), si occupa della gestione dei semafori in accordo con le misure locali e le politiche di area suggerite dal Supervisore, assicurando anche la priorità semaforica ai veicoli di trasporto pubblico. Il sistema opera su 300 incroci in area urbana, con circa 3000 unità di rilevamento del traffico (Figura 2.4).
4. Il sottosistema di gestione dei parcheggi che è connesso con 28 parcheggi automatici, fornisce previsioni sulla disponibilità dei posti.
5. Il sottosistema ambiente che permette di prevedere le condizioni ambientali sul breve periodo utilizzando le previsioni meteorologiche, i dati sull'inquinamento e sul traffico, e mettendo tali informazioni a disposizione del Supervisore per l'azione di adeguate politiche sulla mobilità (Figura 2.4).



Figura 2.4 Sistema 5T – Gestione integrata della mobilità  
(Antoniola, 2016)

6. Il sottosistema di indirizzamento collettivo (VMS), che fornisce, tramite l'ausilio di pannelli a messaggio variabile, informazioni di indirizzamento dinamico verso i

quartieri della città e informazioni in tempo reale sui posti disponibili presso i parcheggi automatizzati. Tale sistema opera, mediante l'ausilio di 26 pannelli di instradamento e di 20 pannelli di guida ai parcheggi (Figura 2.5).

7. Il Sottosistema d'informazione all'utenza, offre tramite Internet e messaggi SMS informazioni in tempo reale sullo stato dei trasporti pubblici, del traffico e dei parcheggi. In particolare tale sistema assiste chi si sposta con informazioni on line per pianificare prima o durante il viaggio, il mezzo ed il percorso origine/destinazione migliore. Il sistema 5T ha quindi permesso di ottenere una riduzione dei tempi di viaggio per il traffico privato nell'area controllata dal sistema del 20% circa, ed un aumento del 17% della velocità commerciale dei mezzi pubblici grazie alla gestione della priorità semaforica (Figura 2.5).



Figura 2.5 Sistema 5T – Servizi di infomobilità  
(Antoniola, 2016)

## 2.5.2 Il Sistema integrato di gestione del traffico di Roma

Roma ha un'economia fondata prevalentemente sui servizi, dislocati principalmente nel centro della città. Allo scopo di diminuire gli impatti negativi causati dal traffico, l'amministrazione comunale nel 1999 ha promosso la realizzazione di un Sistema ITS Integrato per il Monitoraggio e la Gestione del Traffico. Il cuore del Sistema ITS di Roma è la Centrale di Controllo del Traffico che monitora, gestisce e controlla il traffico urbano attraverso diversi sottosistemi, ciascuno dedicato all'assolvimento di funzioni specifiche di monitoraggio e/o regolazione dei flussi di traffico quali (TTS):

1. Il Mobility Management System (MMS), che è il sistema che integra fra loro i diversi sottosistemi, attraverso uno scambio biunivoco di dati sulla base di un grafo di riferimento georeferenziato rappresentativo della viabilità primaria della città di Roma. La comunicazione fra sottosistemi si svolge attraverso l'utilizzo di reti WAN e LAN e protocolli TCP/IP.
2. Il sistema di regolazione semaforica che centralizza oltre 400 impianti semaforici ed è basato sul software SPOT/UTOPIA (Urban Traffic Optimisation by Integrated Automation) di regolazione dinamica dei cicli semaforici.
3. Il sistema di monitoraggio dei flussi di traffico, costituito da più di 2500 spire su strada e da oltre 65 stazioni di rilevamento del traffico in tempo reale ubicate in punti critici della rete stradale. I dati di traffico sono generati dai sensori ogni minuto e sono disponibili all'MMS ogni 5'. Il sistema fornisce anche dati di input per le attività di pianificazione consentendo di rendere validi i modelli su dati di traffico reali.
4. Il sistema di informazione all'utenza attraverso pannelli a messaggio variabile posti sui principali itinerari stradali. Tali pannelli forniscono, in automatico, informazioni sullo stato di servizio (quali ad esempio rallentamenti, congestione, code, ecc.) di alcuni itinerari stradali, desunte dall'elaborazione dei dati di traffico generati dai sensori locali. Sui pannelli possono anche essere inserite informazioni generali riguardanti per esempio eventi programmati (ad es. scioperi, manifestazioni, chiusure o deviazioni) o raccomandazioni di carattere generale (ad es. campagne sulla sicurezza stradale).
5. Il sistema IRIDE per il controllo degli accessi per il controllo automatico degli accessi alla ZTL (Zona a traffico Limitato) del centro storico. Il sistema è basato su varchi e telecamere per il rilevamento automatico delle targhe dei veicoli in ingresso confrontandole con la lista di quelle autorizzate. Se il veicolo non è nella lista, il sistema attiva automaticamente la procedura di sanzionamento.
6. Il sistema di videosorveglianza, composto da oltre 60 telecamere comandabili da remoto (mediante la rotazione orizzontale e verticale delle telecamere e mediante lo zoom) dislocate nei dintorni delle aree basilicali in prossimità di incroci ad elevata criticità. Le immagini sono anche trasmesse in tempo reale sia alla centrale che alla sala operativa della Polizia Municipale come supporto alla rilevazione degli incidenti.
7. Il sistema PARK per il controllo dei parcheggi che gestisce i parcheggi di scambio di Laurentina e Magliana attraverso unità per il conteggio automatico dei veicoli in ingresso/uscita in grado di comunicare in tempo reale alla Centrale di Controllo Traffico lo stato di occupazione degli spazi.
8. Il sistema TIC (Traffic Information Centre) di informazione sul traffico che gestisce la diffusione delle informazioni sullo stato del traffico (rallentamenti, code, ecc.), i

lavori in corso, gli eventi programmati (chiusura strade, manifestazioni, ecc.) ed eccezionali (incidenti, ecc.). L'informazione viene fornita tramite e-mail, sito web, televideo e sms.

Il sistema ITS di Roma è in esercizio dal 2000 in occasione del Giubileo e, nelle zone gestite dalla Centrale di Controllo del Traffico, ha permesso una diminuzione del 10% dei tempi di viaggio e del 12% del numero di incidenti, ed una riduzione del 15% delle emissioni inquinanti.

### **2.5.3 Il Sistema Safety Tutor in Italia**

Il Sistema Safety Tutor, sviluppato da Autostrade per l'Italia, è un sistema impiegato per incrementare la sicurezza stradale. Tale sistema infatti, attraverso l'installazione di portali sull'infrastruttura, permette di rilevare sia la velocità istantanea dei veicoli che quella media ed acquisire le immagini della targa dei veicoli in infrazione su strade con carreggiate multicorsia ad alta densità di traffico, fino a 255 Km/h.

Il sistema è costituito nel dettaglio da unità di rilevamento dei veicoli, unità di cattura immagine e letture targhe, unità di elaborazione locale; modulo di sicurezza, unità di sincronizzazione oraria e unità di comunicazione.

Il funzionamento del sistema prevede che vengano rilevate le velocità medie dei veicoli su tratte di autostrada di lunghezza variabile, dai 10 ai 25 km, delimitati da due portali ai quali sono collegati dei sensori posti sotto l'asfalto e delle telecamere installate invece sui portali stessi. Si tratta quindi di una strumentazione complessa che permette di monitorare l'andamento di ogni singolo veicolo. Nell'attraversare il portale, il sensore rileva la tipologia di veicolo (camion, automobile, bus, moto, etc.) e attiva la telecamera che rileva targa e registra la data e l'ora del passaggio. Alla fine della tratta in analisi, il sensore del portale d'uscita si comporta allo stesso modo di quello all'entrata, rilevando targa del veicolo, data e ora del passaggio. Un sistema centralizzato abbina in seguito i dati rilevati dai due sensori, quello di entrata e di uscita, determinando in tal modo la velocità media (il rapporto tra lo spazio percorso e il tempo impiegato nel percorrerlo) di ciascun veicolo. Ovviamente il sensore tiene conto dei limiti di velocità specifici di ciascuna tipologia di veicolo transitato. In caso di violazione, il sistema interroga automaticamente il database della motorizzazione civile per risalire all'intestatario del veicolo. La Polizia Stradale accerterà la violazione e successivamente il sistema si occuperà di compilare, stampare e avviare la procedura di notifica al trasgressore. I dati relativi ai veicoli la cui velocità media non supera quella consentita vengono automaticamente eliminati (Figura 2.6) [14].

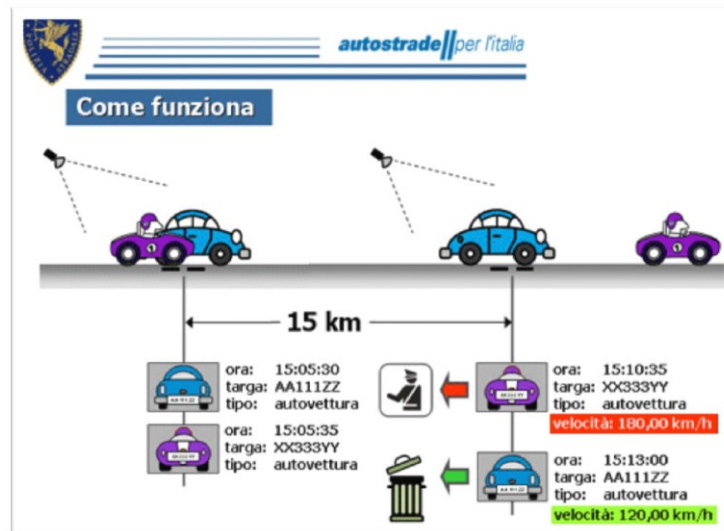


Figura 2.6 Schematizzazione del funzionamento del *Sistema Tutor*  
(Autostrade per l'Italia, 2015)

Di seguito è riportata una mappa in cui è evidenziata la rete autostradale italiana dove è attivo il servizio Tutor (Figura 2.7).



Figura 2.7 Rete autostradale italiana dove è attivo il *Sistema Tutor*  
(Autostrade per l'Italia, 2015)

Attualmente il controllo della velocità tramite Safety Tutor è attivo su circa 2.700 km di carreggiate (pari a circa il 39% della rete del Gruppo Autostrade per l'Italia), funziona 24h al giorno per 365 giorni all'anno ed a differenza dei sistemi tradizionali, è in grado di funzionare anche in caso di condizioni metereologiche avverse.

Questo sistema ha portato ad una significativa riduzione della velocità e quindi dell'incidentalità (Autostrade per l'Italia, 2015). Infatti, il sistema Tutor gradualmente introdotto sulla rete autostradale dal 2005, ha dimostrato numericamente di essere uno strumento positivo, capace di modificare il comportamento degli automobilisti alla guida e di garantire una maggiore sicurezza sulle autostrade italiane.

## **2.6 Riferimenti Normativi e Piano d'Azione dei sistemi ITS**

I cardini per la definizione di una politica europea sugli ITS sono il Libro Bianco del 2001 "La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte", la revisione di medio-termine del Libro Bianco "Mantenere l'Europa in movimento – mobilità sostenibile per il nostro continente", e il Libro Bianco "Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti– Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile" del 2011, nonché il Piano di Azione ITS di dicembre 2008 e la Direttiva 2010/40/UE del 7 luglio 2010.

Per completezza occorre citare, come documenti strategici per quanto concerne lo sviluppo degli ITS in Europa, anche il Libro Verde "Verso una nuova cultura per la mobilità urbana" del 2007, il Piano di Azione per la Logistica del trasporto merci del 2007, la Comunicazione su "ICTs for Energy Efficiency" del 2008, il Piano d'Azione sulla Mobilità Urbana del 2009, il Piano d'Azione per le Applicazioni Satellitari GNSS del 2010, nonché, in particolare per quanto concerne il trasporto pesante, il Regolamento (UE) N. 1266/2009 della Commissione del 16 dicembre 2009.

Allo scopo di promuovere lo sviluppo dei sistemi ITS in modo interoperabile ed in modo armonioso, la Commissione Europea, con la comunicazione n. 886 del 16 dicembre 2008, ha pubblicato il Piano D'azione per la diffusione dei Sistemi di Trasporto Intelligenti in Europa noto come "ITS Action Plan". L'obiettivo dell'ITS Action Plan è quello di creare le condizioni di tipo normativo, organizzativo, tecnologico e finanziario atte a favorire il passaggio da una fase di applicazione limitata e frammentata ad una diffusione coordinata su vasta scala degli ITS su tutto il territorio europeo. Con l'ITS Action Plan la Commissione ha quindi posto le basi per "accelerare e coordinare la realizzazione di ITS nel trasporto stradale, comprendendo le interfacce con gli altri modi di trasporto", in una visione totalmente



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

Il 7 luglio 2010 il Parlamento Europeo ed il Consiglio dell'Unione Europea hanno approvato la Direttiva 2010/40/UE sul quadro generale per la diffusione dei sistemi intelligenti nel settore del trasporto stradale e nelle interfacce con altri modi di trasporto. Obiettivo della Direttiva è di istituire un quadro a sostegno della diffusione e dell'utilizzo di sistemi di trasporto intelligenti coordinati e coerenti nell'Unione, in particolare attraverso le frontiere tra gli Stati membri, stabilendo le condizioni generali necessarie a tale scopo. La Direttiva 2010/40/UE è, quindi, di fatto, l'atto legislativo che concretizza le azioni previste dall'ITS Action Plan inserendole nelle agende politiche degli Stati Membri.

L'iniziativa tecnico-giuridica che caratterizza più di tutte lo sviluppo e l'adozione degli ITS in Italia è rappresentata dal Decreto-Legge del 18 ottobre 2012 n. 179 "Ulteriori misure urgenti per la crescita del paese", definito anche Decreto Sviluppo Bis, convertito, con modificazioni, dalla legge 17 dicembre 2012, n° 211. Tale Decreto-Legge, nell'ambito dell'art. 8 "Misure per l'innovazione dei sistemi di trasporto", recepisce la Direttiva europea 2010/40/UE sul "Quadro generale per la diffusione dei Sistemi Intelligenti di Trasporto (ITS) nel settore del trasporto stradale e nelle interfacce con altri modi di trasporto".

Il decreto interministeriale 39 del 1 febbraio 2013 recante "Diffusione dei sistemi di trasporto intelligenti (ITS) in Italia" costituisce la base metodologica ed operativa del Piano di Azione Nazionale.

Infine, il Decreto interministeriale 446/14 individua nel Ministero delle infrastrutture e dei trasporti l'organo nazionale deputato all'adozione del "Piano nazionale per lo sviluppo dei sistemi ITS" nonché alle relative conseguenti comunicazioni in materia alla Commissione europea.

# CAPITOLO 3

## LA SIMULAZIONE DEI SISTEMI DI TRASPORTO E LORO INTERAZIONI

### 3.1 Modelli per la simulazione dei sistemi di trasporto

Il sistema delle attività sociali, economiche e culturali di ogni civiltà ha da sempre avuto una stretta connessione con i sistemi di trasporto. Basti pensare che lo sviluppo di questi due sistemi è sempre andato di pari passo e che qualsiasi ipotesi sul futuro è sempre associata ad un innovativo sistema di trasporto.

Per simulare un sistema di trasporto, data la sua complessità e la molteplicità dei fattori in gioco, in genere si ricorre a modelli di simulazione, che non si limitano solo a simulare il funzionamento attuale del sistema, cosa che avrebbe scarso interesse dal punto di vista ingegneristico, bensì mirano a valutare l'effetto di interventi prima che essi siano realizzati, consentendo di ottimizzare le risorse impiegate scegliendo gli interventi migliori da attuare sul sistema di trasporto.

Una soluzione alternativa, consiste in un uso più intelligente delle infrastrutture presenti sul territorio; attraverso un monitoraggio continuo, una raccolta di informazioni e dati e l'applicazione di azioni preventive, si può tentare di evitare la formazione di ingorghi e di rallentamenti e quindi di sfruttare al meglio la rete esistente.

In generale, si privilegiano i modelli di tipo quantitativo, rispetto ai metodi qualitativi, perché consentono di dedurre delle conclusioni numeriche sulle prestazioni offerte dal sistema. Si preferisce, infatti, evitare il ricorso a caratterizzazioni puramente analitiche, poiché l'evoluzione della velocità nel tempo è governata da complessi fenomeni dinamici.

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 crescita del numero di veicoli circolanti ed ai sempre più frequenti problemi di sovraccarico della rete stradale.

Secondo Ortúzar, infatti, un modello di traffico può contribuire ad una migliore realizzazione di un'opera e migliorare la pianificazione di interventi nel campo dei trasporti (J. Ortúzar et al., 2011).

Secondo Cascetta i sistemi di trasporto sono sistemi complessi, composti da infrastrutture, veicoli, tecnologie di controllo ma anche da regole, organizzazione dei servizi e tariffe; tutti elementi che, nel loro insieme, concorrono a fornire opportunità di trasporto per soddisfare la domanda di spostamenti di persone e merci espressa dal territorio. In questo modo, i modelli matematici utilizzati per simulare diversi aspetti dei sistemi reali forniscono, così, un supporto indispensabile per la progettazione e la valutazione di interventi sulle componenti "materiali" ed "immateriali" del trasporto. (Cascetta et al., 2006).

I modelli di analisi, simulazione e previsione del traffico, dunque, permettono di:

- ridurre i tempi: eseguire un esperimento su sistema reale può richiedere molto tempo mentre con la simulazione bastano pochi minuti per ottenere gli stessi risultati;
- ridurre i costi: gli esperimenti svolti direttamente sul sistema reale possono essere molto onerosi. Uno studio di simulazione, invece, riduce sensibilmente il rischio di costo perché consente di valutare in anticipo le conseguenze economiche legate alle scelte di gestione ipotizzate, spesso legate a molti fattori non facilmente valutabili;
- avere una maggiore comprensione del fenomeno e ripetibilità: nella realtà è impossibile sperimentare il sistema più di una volta senza che vi siano variazioni nei parametri iniziali. Nella simulazione, invece, si può ripetere la stessa sequenza di eventi alle stesse condizioni iniziali ma a partire da input differenti: i risultati dello stesso problema sono direttamente confrontabili e permettono di operare, quindi, delle scelte ottimali. Inoltre l'esperimento, essendo ripetibile, concede più possibilità per raccogliere i dati a differenza del caso reale.

Di seguito, dopo una trattazione di carattere generale sull'identificazione dei sistemi di trasporto e della loro rappresentazione, saranno descritti i modelli presenti in letteratura con i quali è possibile simulare un sistema di trasporto a livello macroscopico.

Successivamente, ci si soffermerà ad analizzare i modelli di diagnosi e previsione del traffico utili per la conoscenza delle condizioni di funzionamento attuali e future della rete. Infine, si esamineranno i modelli di emissione utilizzati per riprodurre gli impatti dei sistemi di trasporto in termini di inquinamento e per far emergere i fenomeni ad essi associati.

### 3.1.1 Identificazione del sistema di trasporto

Un sistema di trasporto può essere definito come la combinazione di elementi e delle loro interazioni, che producono la domanda di trasporto all'interno di una data area e i servizi di offerta di trasporto per soddisfare questa domanda (Cascetta, 2001). Tale definizione è abbastanza generale, e può essere applicata in differenti contesti.

Da un punto di vista applicativo, per simulare un sistema di trasporto è necessario isolarne gli elementi più importanti e considerare le interazioni più rilevanti, dal momento che è impossibile tenere in considerazione tutti gli elementi interagenti fra loro. In altri termini, come per tutte le discipline ricadenti nell'ambito dell'ingegneria, è necessario costruire un modello semplificato di quella che è la complessa realtà. Tale modello semplificato deve garantire il giusto compromesso fra la capacità di simulare il fenomeno in maniera sufficientemente aderente alla realtà e la trattabilità teorica e computazionale del modello stesso.

Benché la nascita dell'ingegneria dei sistemi di trasporto si può fare risalire agli anni cinquanta del secolo scorso (Wardrop, 1952), le prime trattazioni sistematiche relative alla simulazione di un sistema di trasporto risalgono agli anni settanta (Potts e Olivier, 1972) e si susseguono negli anni ottanta (Newell, 1980; Sheffy, 1985) e novanta (J. Ortúzar, 1994; Cascetta, 1998), fino agli anni più recenti (Cascetta, 2001), essendo tale disciplina tuttora in continua evoluzione.

Un sistema di trasporto è costituito da due parti che interagiscono fra loro: l'offerta e la domanda.

L'offerta è costituita dalle componenti fisiche ed organizzative finalizzate alla produzione dei servizi di trasporto in una determinata area. Per simulare un sistema di trasporto è necessario riprodurre il modo in cui il livello di servizio offerto da tali componenti è influenzato dagli utenti che se ne servono. L'approccio più diffuso per simulare l'offerta di trasporto si avvale delle reti, che sono costituite da grafi, con i quali è possibile rappresentare la struttura topologica dell'offerta e delle funzioni di costo associate agli archi e ai nodi, con le quali si simulano le prestazioni del sistema.

La domanda è costituita dall'insieme dei viaggiatori e delle merci con determinate caratteristiche che si spostano in una determinata area in un intervallo di tempo. Questa è simulata attraverso opportuni modelli che possono essere visti come una relazione matematica che fornisce il valore medio del flusso di domanda in un determinato periodo di riferimento con le sue caratteristiche rilevanti, dati il sistema delle attività insediate nel territorio e l'offerta di trasporto.

Il funzionamento di un sistema di trasporto dipende dall'interazione domanda-offerta: da una parte le prestazioni del sistema di offerta possono essere influenzate dalla domanda, e

dall'altra le scelte di viaggio e, di conseguenza, i flussi di traffico, dipendono dalle caratteristiche dell'offerta. Tale fenomeno è simulato attraverso modelli che si differenziano a seconda di alcune ipotesi, fra le quali: la scelta del percorso da parte degli utenti (che può essere simulata con modelli deterministici o stocastici), l'influenza sul livello di servizio di un dato componente dell'offerta degli utenti che si servono del componente stesso.

Esiste una grande varietà di modelli del traffico: si fornirà una breve classificazione e successivamente saranno illustrati con maggiore dettaglio i modelli di simulazione macroscopici poiché, rispetto a quelli microscopici, si prestano meglio alla progettazione di un sistema di controllo e regolazione del traffico.

### **3.1.2 I modelli macroscopici**

In letteratura, con riferimento al livello di dettaglio, si individuano due modelli di traffico: i modelli di micro-simulazione e modelli di macro-simulazione.

I modelli di traffico di micro-simulazione riproducono delle regole principali che governano il comportamento del singolo utente e permettono la comprensione del fenomeno complessivo, come l'interazione tra i veicoli e quella tra veicolo e infrastruttura. Essi 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, ecc.). Durante la simulazione, la rete è caricata con un flusso di veicoli, che durante il percorso che li conduce alle rispettive destinazioni, interagiscono gli uni con gli altri e con l'infrastruttura, secondo quanto previsto dal particolare modello microscopico utilizzato. Questo consente di visualizzare in maniera realistica il movimento dei singoli veicoli e di seguire l'evoluzione del traffico sulla rete.

Al contrario, nella macro-simulazione il traffico è descritto come un flusso continuo definito da regole comportamentali che si basano principalmente sull'interazione dei veicoli con l'infrastruttura. Questi modelli descrivono, dunque, l'evoluzione di una corrente veicolare ad un alto livello di aggregazione, riassumendo così un'informazione su più veicoli.

Negli ultimi anni sono stati proposti anche alcuni modelli misti, detti mesoscopici, che si basano sulle simulazioni di tipo microscopico o quasi-microscopico ed hanno caratteristiche macroscopiche di collegamento (come, ad esempio, i concetti di velocità e densità aggregate). Questi modelli concentrano l'attenzione sul comportamento di insiemi di utenti e gli output che si ottengono sono riferiti, appunto, a tali gruppi e non ai singoli veicoli (come nella micro-simulazione). Ogni singolo insieme è composto da veicoli che hanno la stessa origine, la stessa destinazione e la stessa strategia di scelta (percorso, velocità, ecc.) durante il loro movimento. Di questi gruppi, si simula lo spostamento rigido seguendone la traiettoria nello

spazio; quanto più piccola è la dimensione del gruppo, tanto più la soluzione del modello sarà vicina al tipo microscopico.

La scelta del modello da utilizzare dipende dal livello di dettaglio richiesto dall'applicazione. Per effettuare stime e valutazioni relative alla domanda ed all'offerta di trasporto, nonché all'interazione tra queste (assegnazione), è bene fare riferimento all'uso di modelli macroscopici (Figura 3.1).

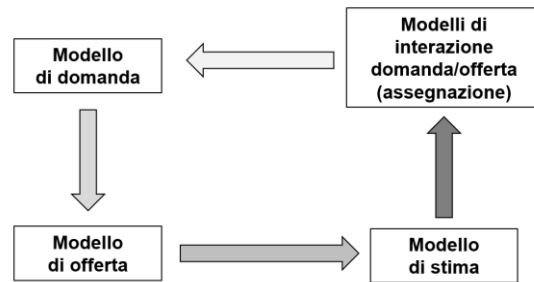


Figura 3.1 Interazione tra i modelli macroscopici

Tipicamente, un modello macroscopico definisce una relazione tra densità veicolare  $\rho(x,t)$  (numero di veicoli contenuti in una corsia di un determinato tronco stradale), velocità media  $v(x,t)$  e flusso di traffico  $q(x,t)$  (numero di veicoli che attraversano una sezione stradale nel tempo):

$$q(x, t) = \rho(x, t) \cdot v(x, t) \quad \text{Eq. (3.1)}$$

Si ricordano il modello del primo ordine di Lighthill e Witham (Lighthill e Witham, 1955) e quello sviluppato da Richards (Richards, 1956), che utilizzano come variabile per rappresentare lo stato del sistema unicamente la densità.

Successivamente, Payne sviluppò il primo modello macroscopico del secondo ordine che ricorre invece alla densità e alla velocità media (Payne, 1971), ed infine si ha quello di Helbing, un modello di traffico del terzo ordine che utilizza come variabili di stato densità, velocità media e varianza della velocità (Helbing, 1996).

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 e, dunque, un 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.

I modelli di macro-simulazione prevedono la definizione di una domanda di mobilità, di un'offerta di trasporto, e poi, dall'interazione della domanda e dell'offerta, si riescono a calcolare gli indicatori relativi a ciascuno stato di traffico. Nei paragrafi successivi sono analizzati i tre aspetti elencati precedentemente.

### 3.1.2.1 Modellazione dell'offerta

Un modello di offerta simula il livello di servizio, cioè le prestazioni, associate alle componenti fisiche ed organizzative finalizzate alla produzione dei servizi di trasporto in funzione delle caratteristiche di tali componenti ed eventualmente del numero di utenti che se ne servono. Dunque, nell'offerta si ha la rappresentazione sintetica e schematica della possibilità di effettuare il viaggio che si vuole compiere, per cui la costruzione di un modello di offerta consiste nella sua rappresentazione per mezzo di una *rete*, cioè di un grafo orientato ai cui archi sono associate le funzioni di costo (Cascetta, 2001).

Un grafo, cui è associata la configurazione topologica del sistema di trasporto, è costituito da una coppia ordinata di insiemi: un insieme di  $N$  elementi, detti nodi ed un insieme  $L$  di coppie di nodi appartenenti ad  $N$ , dette archi o rami (Figura 3.2).

Più in dettaglio i componenti di un grafo sono:

- *archi reali*, che rappresentano le infrastrutture viarie rilevanti (cioè quelle che sono destinate prevalentemente agli spostamenti interzonali);
- *nodi reali*, che rappresentano le intersezioni fra le infrastrutture viarie o punti nei quali si modificano significativamente le caratteristiche delle infrastrutture;
- *centroidi interni ed esterni*, che costituiscono nodi del grafo;
- *archi fittizi*, che collegano i centroidi alla rete reale (cioè il sottografo costituito da archi e nodi reali);
- *nodi fittizi*, che costituiscono punti di connessione fra gli archi fittizi e la rete reale.

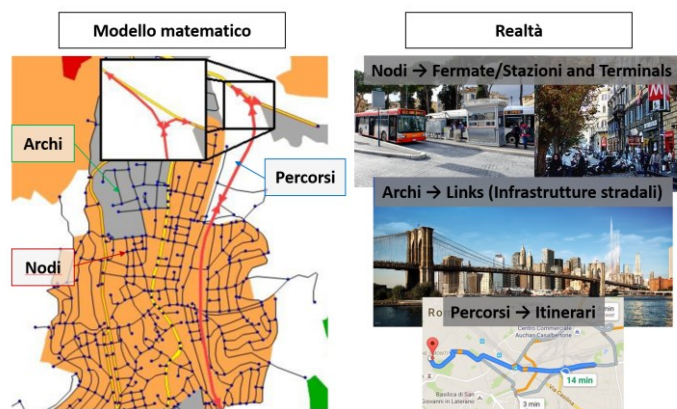


Figura 3.2 Rappresentazione dell'offerta mediante un grafo di rete  
(Gentile, 2016)

I grafi costituiscono, dunque, un potente mezzo di riproduzione della realtà, ma danno una rappresentazione esclusivamente "topologica", ossia consentono unicamente di sapere se fra due qualunque elementi del sistema esiste la relazione che definisce gli archi. A questo

proposito si introducono le funzioni di costo, le quali sono specifiche per ogni tipo di analisi. Ad ogni arco viene, pertanto, associato un *flusso di arco*, cioè il numero di utenti (o veicoli) che lo attraversa nell'unità di tempo, ed un *costo di arco* che ogni utente deve sostenere per attraversarlo. Ogni utente per raggiungere dalla propria origine la destinazione prescelta ha a disposizione un insieme di percorsi, cioè una sequenza di archi che ha come nodo iniziale il centroide origine e come nodo finale il centroide destinazione. Anche a ciascuno di questi percorsi può essere associato un *flusso di percorso* e dei *costi di percorso*. Tra questi, la funzione di costo generalizzato sintetizza il valore del costo sostenuto dagli utenti così come da essi percepito.

### 3.1.2.2 Modellazione della domanda

La domanda di mobilità è rappresentata mediante *matrici origine-destinazione* e corrisponde al numero di utenti con determinate caratteristiche, che utilizzano uno o più sistemi di trasporto in un intervallo di tempo per spostarsi da un'origine ad una destinazione. La sua unità di misura si può esprimere in diversi modi a secondo a cosa si ci riferisce: veicoli/ora per il trasporto stradale individuale, passeggeri/ora per il trasporto collettivo e tonnellate/ora per le merci. La domanda di mobilità rappresenta, dunque, un flusso di spostamenti.

Lo studio della domanda di mobilità necessita di step necessari alla corretta individuazione dei flussi. Questi consistono nella definizione dell'area di studio, cioè l'area effettivamente che si vuole analizzare, nella suddivisione del territorio in zone di traffico, nell'individuazione dei punti di accesso e di uscita dalla suddetta area di studio e nella costruzione delle matrici origine-destinazione.

In generale, per simulare un sistema di trasporto non si può prescindere dalla simulazione della domanda. La struttura generale di un modello di domanda di trasporto in ambito urbano è rappresentata da una sequenza di sottomodelli, nota come *modello di domanda a quattro stadi* (Cascetta, 2001):

$$d_{odmr}^{gsh} = d_o^{gsh} \cdot p_{d/o}^{gsh} \cdot p_{m/od}^{gsh} \cdot p_{r/odm}^{gsh} \quad \text{Eq. (3.2)}$$

dove:

- $d$  rappresenta la domanda della categoria veicolare  $g$ , che parte dall'origine  $o$ , è diretta alla destinazione  $d$ , per il motivo  $s$ , nella fascia oraria  $h$ , utilizzando il modo  $m$  ed il percorso  $r$ ;
- $d_o^{gsh}$  è il *modello di emissione*, che fornisce la percentuale di individui che, trovandosi in  $o$ , effettuano  $x$  spostamenti per il motivo  $s$  nella fascia oraria  $h$ ;



- $p_{d/o}^{gsh}$  è il *modello di distribuzione*, che fornisce la percentuale di individui che, spostandosi da  $o$  per il motivo  $s$  nella fascia oraria  $h$ , si recano nella zona di destinazione  $d$ ;
- $p_{m/od}^{gsh}$  è il *modello di scelta modale*, che fornisce la percentuale di individui che, spostandosi da  $o$  a  $d$  per il motivo  $s$  nella fascia oraria  $h$ , utilizzano il modo di trasporto  $m$ ;
- $p_{r/odm}^{gsh}$  è il *modello di scelta del percorso*, che fornisce la percentuale di individui che, spostandosi da  $o$  a  $d$  per il motivo  $s$  nella fascia oraria  $h$  con il modo  $m$ , utilizzano il percorso  $k$ .

Ciascuna fase è ovviamente condizionata dalle fasi precedenti. Il risultato dei primi tre stadi rappresenta una *matrice origine-destinazione* per ogni modo desiderato, che rappresenta gli spostamenti che interessano l'area di studio, in un determinato periodo di tempo, suddivisi per luoghi (zone) di origine e di destinazione. La struttura del modello a quattro stadi è schematizzata in Figura 3.3.

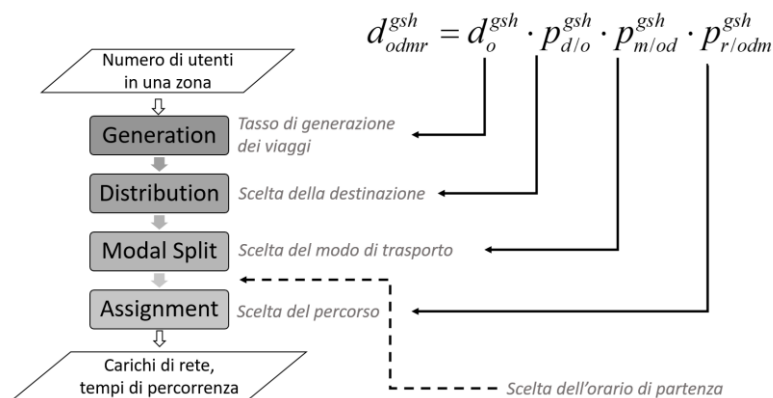


Figura 3.3 Struttura del modello a quattro stadi  
(Gentile, 2016)

### 3.1.2.3 Interazione domanda-offerta

L'incontro tra domanda e offerta si traduce nella procedura di assegnazione del traffico; questa consente di calcolare i flussi sugli archi (offerta) prodotti da una matrice O/D (domanda) e gli indicatori che descrivono la qualità del servizio tra zone di traffico (prestazioni). Da sottolineare, inoltre, la dipendenza tra domanda, flussi e costi; infatti la domanda è influenzata dai costi, i costi dipendono dai flussi e i flussi a loro volta dipendono dalla domanda.

In funzione di varie ipotesi sulla domanda, sull'offerta e sulla loro interazione si possono realizzare diversi modelli di assegnazione. Queste ipotesi determinano alcuni fattori di classificazione dei modelli di assegnazione.

I fattori relativi all'offerta sono:

- il tipo di servizio, che può essere simulato in modo continuo nel tempo oppure in modo discontinuo, rappresentando l'offerta per mezzo di *reti diacroniche* ed effettuando una cosiddetta assegnazione *ad orario*;
- l'effetto della congestione, che può essere tenuto in conto (reti congestionate) o meno (reti non congestionate).

I fattori relativi alla domanda sono:

- la segmentazione della domanda, in funzione della quale si può effettuare una assegnazione *mono-classe*, nella quale gli utenti sono distinti esclusivamente per la coppia origine-destinazione, oppure *multi-classe*, nella quale almeno per una coppia origine-destinazione si considerano più categorie di utenti, ciascuna delle quali presenta differenti caratteristiche comportamentali e percepisce costi diversi;
- l'elasticità della domanda, in funzione della quale si può effettuare una assegnazione a *domanda rigida* oppure a *domanda elastica*;
- il comportamento di scelta del percorso, che può essere *completamente preventivo*, se si assume che il decisore scelga il proprio percorso basandosi solo sulle informazioni disponibili all'origine dello spostamento, oppure *preventivo-adattivo*, se si assume che il decisore assuma all'origine dello spostamento una strategia di viaggio in funzione delle informazioni a sua disposizione, e compia successivamente delle scelte durante il viaggio in funzione delle nuove informazioni disponibili;
- il modello di scelta del percorso, che può essere *deterministico* oppure *probabilistico*;
- l'obiettivo perseguito dall'utente, che può consistere nella massimizzazione della propria utilità oppure nella massimizzazione dell'utilità collettiva degli utenti del sistema.

I fattori relativi all'interazione domanda-offerta sono:

- la simulazione dell'evoluzione dinamica intraperiodale del sistema, cioè tenendo conto delle variazioni che intervengono all'interno del periodo di simulazione, oppure la simulazione in condizioni statiche;
- la simulazione dell'evoluzione dinamica inter-periodale del sistema oppure la simulazione del suo stato di equilibrio.

Dalla combinazione dei precedenti fattori si possono ottenere molteplici modelli di domanda, ciascuno adatto a simulare alcune tipologie di contesti.

Se si assume che l'obiettivo dell'utente sia la massimizzazione della propria utilità, si effettua la cosiddetta *assegnazione di ottimo di utente*. In funzione della presenza o assenza di congestione e del modello di scelta del percorso è possibile individuare quattro tipi di assegnazione di ottimo di utente:

- *assegnazione di carico deterministico della rete*, indicata con l'acronimo DNL (*deterministic network loading*), nella quale si assume la rete non congestionata ed il modello di scelta del percorso deterministico. L'assegnazione di carico deterministico della rete è regolata dal primo principio di Wardrop che afferma che per ogni coppia origine-destinazione, il costo di ogni percorso utilizzato è uguale, ed è minore o uguale del costo di ogni percorso non utilizzato;
- *assegnazione di carico stocastico della rete*, indicata con l'acronimo SNL (*stochastic network loading*), nella quale si assume la rete non congestionata ed il modello di scelta del percorso stocastico. L'assegnazione di carico stocastico della rete è regolata dal principio secondo il quale per ogni coppia origine-destinazione il costo percepito dei percorsi utilizzati è minore o uguale del costo di ogni altro percorso. Essendo il modello di scelta del percorso probabilistico, i flussi sono anch'essi variabili aleatorie;
- *assegnazione di equilibrio deterministico degli utenti*, indicata con l'acronimo DUE (*deterministic user equilibrium*), nella quale si assume la rete congestionata ed il modello di scelta del percorso deterministico;
- *assegnazione di equilibrio stocastico degli utenti*, indicata con l'acronimo SUE (*stochastic user equilibrium*), nella quale si assume la rete congestionata ed il modello di scelta del percorso stocastico.

Se si assume che l'obiettivo degli utenti sia la massimizzazione dell'utilità collettiva e non della propria utilità, si ottiene l'assegnazione di ottimo di sistema. Tale tipo di assegnazione ha senso solo se la rete è congestionata, poiché nel caso di rete non congestionata a causa dell'assenza di interazioni fra gli utenti ciascun comportamento che tende a massimizzare la propria utilità contemporaneamente tende a massimizzare l'utilità collettiva degli utenti.

## 3.2 Modelli di diagnosi e previsione del traffico

Gli sforzi degli esperti del settore della simulazione dei sistemi di trasporto hanno condotto alla creazione di modelli matematici che potessero riprodurre fedelmente la realtà. In tal maniera è stato possibile ottenere strumenti informatici che 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.

Secondo l'approccio tradizionale e convenzionale alla pianificazione dei trasporti, partendo da uno studio della domanda, quindi dalla sua rappresentazione mediante matrici origine-destinazione, e da una rappresentazione matematica dell'offerta, schematizzando la rete mediante la teoria dei grafi attraverso archi e nodi, si perviene, utilizzando dei modelli di assegnazione, alla stima dei flussi sugli archi della rete e, quindi, ai tempi di percorrenza. Naturalmente questo riguarda determinati periodi temporali, giornate tipo, ore di punta tipo, ecc. La disponibilità di strumenti ITS che rilevano, invece, gli effettivi flussi ed anche i tempi di percorrenza in tempo reale, consentono di trasformare questa metodologia in un sistema di stima e previsione del traffico real-time (Figura 3.4).

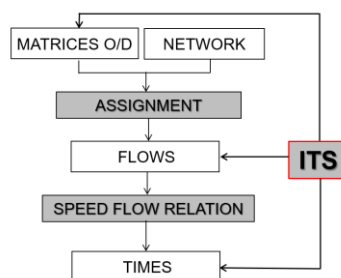


Figura 3.4 Ruolo degli ITS in un sistema di stima e previsione del traffico real-time

La stima delle condizioni di traffico attuali (o diagnosi) è una delle funzioni principali degli ITS. Essa consiste nell'identificazione, qualitativa o quantitativa, dello stato di traffico,

ed è necessaria per riconoscere eventuali anomalie, programmare le azioni di regolazione e fornire informazioni agli utenti. Questa funzione diagnostica costituisce anche il primo passo per la previsione delle condizioni di traffico future (o *prognosi*).

Il problema di diagnosi delle condizioni di traffico attuali consiste nella stima delle variabili caratteristiche delle prestazioni del sistema (flussi, velocità, densità veicolare, tempi di percorrenza) su tutti gli elementi della rete, o su un sottoinsieme ampio e significativo, a partire da osservazioni compiute su un ridotto sottoinsieme di elementi dotati di dispositivi di monitoraggio.

Il problema di prognosi, o previsione delle condizioni di traffico, consiste nella stima delle grandezze in un intervallo di tempo futuro a partire dalle osservazioni passate su una parte o su tutta la rete.

Entrambe le funzioni di diagnosi e di previsione possono essere realizzate mediante metodi statistici di *analisi dei dati* o mediante *modelli di simulazione del traffico*.

I primi hanno il vantaggio di una maggiore semplicità quindi sono di più facile applicazione e, richiedendo tempi di elaborazione molto brevi, possono essere direttamente applicati al controllo in tempo reale; inoltre, estrapolando la tendenza osservata, non sono in grado di prevedere l'evoluzione di situazioni anomale se non dopo che la tendenza delle grandezze osservate si sia stabilizzata.

I secondi, riproducendo il fenomeno fisico, forniscono stime più attendibili ed accurate in situazioni anomale e consentono inoltre di stimare gli effetti di eventuali azioni di regolazione; per contro, richiedendo la simulazione della rete o di una parte di essa, hanno tempi di elaborazione più lunghi e necessitano di un accurato processo di calibrazione.

A seguire si riporta un'analisi dei due metodi ed un approfondimento riguardo il modello di assegnazione dinamica.

### **3.2.1 I metodi statistici di analisi dei dati**

La *diagnosi* e la *previsione* mediante *analisi dei dati* possono essere realizzate con metodi di tipo qualitativo, che forniscono una classificazione dello stato attuale (o futuro) attraverso comparazione dei valori delle variabili osservate, o con metodi di tipo quantitativo, che applicano tecniche di analisi statistica di estrapolazione spaziale (diagnosi) o spazio-temporale (prognosi) dei dati.

I *metodi qualitativi* trovano applicazione nel riconoscimento automatico degli incidenti e nella stima dello stato di traffico. Per questo vengono utilizzati numerosi metodi matematici basati sulla comparazione delle misure di traffico rilevate in sezioni contigue in diversi intervalli di tempo che applicano algoritmi di comparazione diretta (i più noti dei quali sono le varie versioni dell'algoritmo California, l'algoritmo MCMaster, basato sulla teoria delle

catastrofi, il metodo della somma accumulata delle occupazioni) o tecniche di comparazioni più complesse di classificazioni o di riconoscimento delle configurazioni di traffico (vari algoritmi di *clustering* o di *pattern recognition*, basati sul metodo delle componenti principali, reti neurali, metodi di classificazione *fuzzy*).

I *metodi quantitativi* applicano analisi statistiche più o meno avanzate alle misure eseguite contemporaneamente in punti diversi della rete (metodi *bayesiani*, reti neurali) o alle serie storiche di osservazioni compiute in uno o più punti della rete (metodi dei profili temporali, filtro esponenziale, filtro di Kalman, reti neurali). I metodi di analisi dei dati possono essere applicati come stimatori dello stato attuale, per filtrare gli errori dei dati osservati, o essere applicati su intervalli di tempo futuri per la previsione.

I metodi di analisi dei dati sono applicati tradizionalmente alle grandezze macroscopiche rilevate dai dispositivi di monitoraggio (flussi, occupazione, velocità) o loro disaggregazioni (matrice di domanda origine-destinazione); lo sviluppo di identificazione dei veicoli consente anche la misura diretta dei tempi di percorrenza di un campione di veicoli, attraverso la rilevazione dei passaggi in sezioni fisse o il monitoraggio di veicoli sonda che trasmettono i propri dati di posizione e velocità ad intervalli di tempo o di spazio percorso prefissati.

### **3.2.2 I metodi di simulazione del traffico**

I *metodi di simulazione* sono significativamente differenti a seconda che si tratti di un'arteria o di una rete; nel primo caso si possono utilizzare modelli di deflusso macroscopici che applicano le condizioni di continuità del flusso e di condizionamento veicolare (i più noti dei quali sono METANET ed il *Cell Transmission Model*); nel secondo si devono applicare anche modelli di calcolo e di scelta del percorso, che richiedono una stima dinamica della domanda disaggregata a livello di matrice origine-destinazione e comportano una procedura più complessa di ricerca dell'equilibrio dei tempi di percorso e di simulazione del traffico sulla rete. Negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi modelli di assegnazione-simulazione, i più noti dei quali sono Dynasmart (Mahamassani, 2001), DynamMit (Ben-Akiva et al. 1997), Dynameq e Aimsun.

Anche i modelli di simulazione possono essere applicati per la stima dello stato attuale, in modo da ricavare informazioni sugli elementi della rete non sottoposti a monitoraggio, o per la previsione degli stati futuri, estendendo la simulazione agli intervalli di tempo futuri.

Per reti di dimensioni medie o grandi, la simulazione della rete in un intervallo abbastanza lungo da simularne gli spostamenti richiede tempi di elaborazione di diversi minuti incompatibili con applicazioni in tempo reale. Poiché l'avanzamento della simulazione è più rapido di quello del sistema reale, è possibile comunque aggiornare la previsione appena sono disponibili nuovi dati, mantenendo valida la previsione su un intervallo relativamente

lungo fino al successivo aggiornamento. Con questo metodo, noto in letteratura come *'rolling horizon'* (Mahamassani, 2001), è possibile avere una previsione su un periodo relativamente lungo (dell'ordine di un'ora o più) aggiornandola periodicamente con nuove osservazioni ad intervalli relativamente brevi (dell'ordine di 5-10 minuti).

### **3.2.2.1 Modello di assegnazione dinamica**

Come si è visto, i metodi di diagnosi e di previsione basati sull'analisi statistica sono uno strumento diretto ed efficace di estrapolazione delle osservazioni raccolte in tempo reale; non sono in grado però di stimare le condizioni di deflusso su archi non monitorati, se non attraverso metodi di estrapolazione spaziale quali reti neurali addestrate su dati osservati per brevi periodi con rilevatori mobili o su piccoli campioni di dati rilevati con veicoli sonda. Anche in presenza di rilevazioni diffuse, comunque, non sono in grado di fornire previsioni attendibili quando eventi anomali producono uno scostamento improvviso dall'andamento temporale recente. Sebbene questi eventi siano in effetti relativamente rari, non possono essere considerati poco rilevanti, perché è proprio in tali condizioni anomale che gli utenti non sono in grado di effettuare scelte di mobilità informate ed è quindi più necessario un sistema di diagnosi e previsione, che consente di mettere in atto strategie di regolazione e di fornire adeguata informazione agli utenti.

Per superare questi inconvenienti occorre seguire un approccio modellistico, in grado di simulare il funzionamento della rete in funzione di dati in ingresso, in parte rilevati in tempo reale ed in parte stimati sulla base di serie storiche. Infatti, in una rete stradale congestionata l'interazione dinamica tra livello di congestione e scelte di percorso degli utenti ha significative non linearità, ed è dunque necessario applicare un modello di assegnazione-simulazione del traffico in grado di riprodurre queste interazioni, applicando ricorsivamente una stima dinamica della domanda e la sua assegnazione alla rete mediante simulazione.

Nonostante oltre 20 anni di intensi sforzi prodotti nell'ambito della ricerca scientifica (a partire dai primi modelli di Jayakrisham et al, 1994; Ben-Akiva et al, 1997; Adamo et al, 1999), la procedura di assegnazione dinamica (*DTA – Dynamic Traffic Assignment*) rappresenta ancora uno degli argomenti più impegnativi nella modellazione delle reti di trasporto. Alcune formulazioni valide sono disponibili (ad esempio, Friesz et al, 1993; Ran e Boyce, 1994; Heydecker e Addison, 1998), ma occorre pagare un prezzo elevato in termini di realismo del modello sia sul lato dell'offerta (ad esempio considerando modelli semplici senza conflitti di flusso ai nodi e senza fenomeni di congestione o *spillback*) e/o sul lato della domanda (ad esempio usando modelli di ottimo di sistema a fronte di un modello di equilibrio dell'utente). Di conseguenza, anche se nuove ricerche (ad esempio, Mahut e Florian, 2008; Smith e Mounce, 2011; Ramadurai e Ukkusuri, 2011) stanno cercando di

sfruttare alcune delle idee che hanno permesso un miglioramento rilevante nello stato dell'arte per l'assegnazione statica (ad esempio Dial, 2006; Gentile, 2014), a causa delle loro formulazioni standardizzate e fisse ed avendo scarse proprietà matematiche, esse sembrano ancora dominare il panorama dei modelli di DTA modelli oggi a disposizione (una revisione aggiornata di alcuni software accademici e commerciali disponibili per le applicazioni in campo reale può essere trovata in Barcelo, 2010).

D'altra parte, la necessità di modelli di traffico affidabili che possono essere efficacemente risolti anche per grandi reti, è in costante aumento. Una volta riconosciuto il limite posto al realismo utilizzando un approccio statico (ad esempio Gentile, 2010a), DTA viene sempre più vista dagli esperti come uno strumento fondamentale per analizzare le reti congestionate in due distinti casi di utilizzo: offline per la pianificazione dei trasporti, in modo da fornire simulazioni di differenti scenari di progettazione e gestione; real-time per il monitoraggio del traffico, al fine di conoscere le previsioni a breve termine di flussi e velocità. Per quanto riguarda l'aspetto di gestione del traffico, esso attinge elementi da entrambi gli approcci off-line e on-line.

Le precedenti due applicazioni dei modelli di assegnazione presentano una differenza fondamentale. Nel monitoraggio del traffico, l'obiettivo principale delle simulazioni è quello di riprodurre i flussi e i tempi di percorrenza sulla rete di trasporto date una specifica domanda e una determinata offerta, possibilmente in tempo reale. Nella pianificazione dei trasporti, invece, l'obiettivo principale delle simulazioni è quello di confrontare diversi scenari di progettazione. Questa prospettiva diversa implica che, mentre nel secondo caso, questo può essere importante per calcolare soluzioni di equilibrio in modo preciso, anche a costo di adottare una rappresentazione approssimativa dei fenomeni traffico, come quella fornita dai modelli assegnazione statica, è vero il contrario nel primo caso.

Attualmente, nell'ambito del monitoraggio del traffico, il paradigma dell'equilibrio della scelta del percorso non è così spinto, mentre in realtà sono necessari modelli di offerta in grado di riprodurre l'essenza dei fenomeni di congestione presenti in rete, e cioè l'evoluzione nel tempo delle code e della loro possibile propagazione all'indietro (spillback).

In altre parole, anche se il paradigma di assegnazione di equilibrio dell'utente è ancora considerato adeguato nel panorama della modellazione dei trasporti, nel caso del monitoraggio del traffico è data una maggiore importanza al realismo ottenuto con un'assegnazione di carico di tipo dinamica (consistenza dei flussi, tempi di percorrenza e vincoli di capacità) comprese le interazioni dei veicoli ai nodi, oltre alla possibilità di raggiungere una coerenza maggiore tra le scelte di percorso e le performance di ciascun arco (cioè tempi e costi). Mentre, nel caso di applicazioni riguardanti la gestione del traffico, la proprietà considerata essenziale del modello DTA dovrebbe essere la sua sensibilità alle variazioni locali dei principali parametri dell'offerta, ad esempio la riduzione di capacità a causa di eventi anomali di traffico. Per far fronte a questa necessità, i modelli dinamici



applicati in tempo reale (ad esempio, Mahmassani, 2001; Ben-Akiva et al, 2002; Gentile e Meschini 2011) introducono qualche ipotesi semplificativa rispetto ai modelli statici off-line.

La Figura 3.5 mostra lo schema del modello di DTA e l’algoritmo ad esso associato.

La notazione utilizzata relativamente all’assegnazione di equilibrio deterministico degli utenti è la seguente:

- $q_{ytd}$  che indica i flussi degli utenti appartenenti alla classe  $g$ , passanti attraverso la manovra di svolta  $y$ , durante l’intervallo temporale  $[\tau_t, \tau_{t+1}]$  e diretti verso la destinazione  $d$ ;
- $m_{aet}$  percentuale di flusso entrante nell’arco  $a$ , durante l’intervallo temporale  $[\tau_t, \tau_{t+1}]$  ed uscente durante l’intervallo temporale  $[\tau_e, \tau_{e+1}]$  con  $e \geq t$ ;
- $t_{at}$  tempo di percorrenza dell’arco  $a$ , per gli utenti che entrano al tempo  $\tau_t$ ;
- $c_{atg}$  costo dell’arco  $a$ , percepito dagli utenti appartenenti alla classe  $g$ , che entrano al tempo  $\tau_t$ ;
- $w_{atgd}$  costo atteso percepito dagli utenti appartenenti alla classe  $g$ , entranti nell’arco  $a$ , durante l’intervallo temporale  $[\tau_t, \tau_{t+1}]$  e diretti verso la destinazione  $d$ ;
- $p_{atgd}$  probabilità che, durante l’intervallo temporale  $[\tau_t, \tau_{t+1}]$ , gli utenti appartenenti alla classe  $g$  e diretti verso la destinazione  $d$ , scelgono di entrare nell’arco  $a$ , con la condizione di trovarsi in corrispondenza del suo nodo iniziale;
- $d_{odgt}$  domanda relativa al flusso degli utenti appartenenti alla classe  $g$ , che viaggiano dall’origine  $o$  alla destinazione  $d$ , partendo durante l’intervallo temporale  $[\tau_t, \tau_{t+1}]$ .

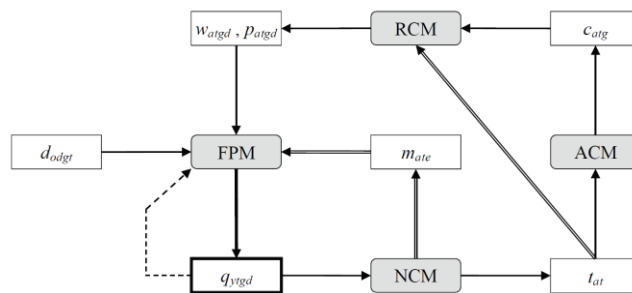


Figura 3.5 Schema del modello di DTA e relativo algoritmo  
(Gentile, 2015)

Questa architettura di modellazione del modello di DTA è caratterizzata dalle seguenti funzioni:

- *NCM – Network Congestion Model*: il modello congestione di rete prende in considerazione come dati di input i flussi di svolta, aggregati per tutte le destinazioni, e fornisce come output i tempi di percorrenza di ciascun arco. Questo modello si

propone di riprodurre diversi fenomeni di traffico, a partire dalla congestione ipocrita, fino alla propagazione all'indietro delle code;

- *ACM – Arc Cost Model*: il modello dei costi di arco utilizza come dati di input i tempi di percorrenza e produce i costi di arco percepiti da ogni classe di utenti;
- *RCM – Route Choice Model*: il modello di scelta del percorso considera in ingresso i costi di arco, così come i tempi di percorrenza di arco che consentono una concatenazione dinamica (all'indietro) delle utilità percepite. Esso produce in output i costi previsti per raggiungere la destinazione con ogni alternativa locale, che vengono poi utilizzati per calcolare le probabilità condizionate di arco. Tuttavia, può essere conveniente effettuare quest'ultimo calcolo direttamente nel FPM.
- *FPM – Flow Propagation Model*: il modello di propagazione del flusso prende come input i dati relativi alla domanda di trasporto e alle scelte locali, come pure la loro propagazione sulla rete o i tempi di percorrenza, che consentono la propagazione dinamica (in avanti) degli utenti. Produce in uscita i flussi di arco diretti verso ogni destinazione.

Questo schema concettuale mostra il problema di punto fisso caratterizzante la procedura di assegnazione dinamica. Infatti, la freccia tratteggiata indica che la variabile iterata è utilizzato nella successiva iterazione, mentre la freccia di rappresentata con uno spessore maggiore indica la presenza di una trasformazione algoritmica dell'iterazione al fine di far convergere all'equilibrio il problema di punto fisso.

### 3.3 Modelli di emissione veicolare

La descrizione analitica del processo di emissione di sostanze inquinanti da parte dei veicoli con motore a combustione interna è fondata sull'individuazione delle variabili indipendenti che influenzano il fenomeno. La difficoltà di spiegare analiticamente i processi chimico-fisici che governano la produzione degli inquinanti in seno al fluido evolvente che viene combusto nel motore consiglia di assumere come variabili indipendenti dei modelli alcuni parametri relativi alle caratteristiche e alle condizioni di funzionamento dei veicoli nel loro complesso (Nuzzolo et al., 1993).

Questi parametri sono molteplici e si possono individuare nei seguenti gruppi:

- *caratteristiche costruttive del veicolo*: possono essere distinte in:
  - caratteristiche generali, peso a vuoto, efficienza aerodinamica, ecc.;
  - caratteristiche dell'apparato di propulsione, tipo di motore, tipo di combustibile, di dispositivi di controllo delle emissioni, caratteristiche di cilindrata e di potenza;

- *stato della meccanica del veicolo*: stato di usura, stato di manutenzione, le condizioni di regolazione;
- *condizioni operative del veicolo nelle condizioni reali di traffico*: sono le caratteristiche di funzionamento dell'apparato di propulsione. Esse possono essere divise in due categorie, fra loro dipendenti, quelle legate alla dinamica del motore, le più importanti delle quali sono la velocità di rotazione del motore e l'entità del carico ad esso fornito e quelle che descrivono lo stato termodinamico del fluido evolvente all'interno del cilindro, stato il quale determina le caratteristiche della combustione.

Le caratteristiche costruttive, di stato della meccanica e operative del veicolo sono influenzate a loro volta dalle condizioni dell'ambiente esterno, sia da quelle di tipo storico-riguardanti cioè la vita passata del veicolo che da quelle operative, ossia attuali (Figura 3.6).

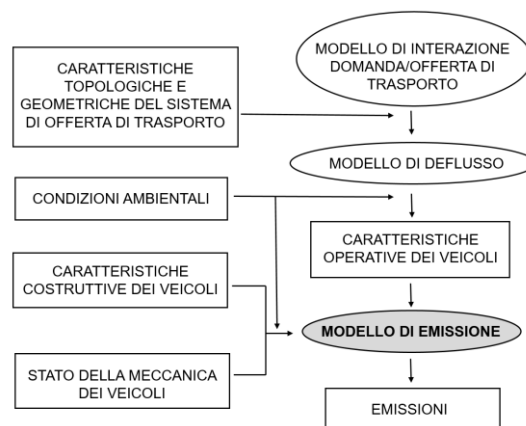


Figura 3.6 Descrizione analitica del processo di emissione

I modelli di emissione consistono nella formulazione matematica delle relazioni esistenti tra le emissioni inquinanti dei veicoli a motore e le variabili da cui tali emissioni sono influenzate (caratteristiche costruttive, stato della meccanica e condizioni di funzionamento dei veicoli, condizioni dell'ambiente esterno) (Horowitz, 1982).

Per prima cosa bisogna determinare le variabili indipendenti significative. Come risulta da studi sperimentali proposti in letteratura, le variabili che maggiormente influenzano l'entità delle emissioni riguardano le caratteristiche costruttive dei veicoli (Jost et al., 1992) (Simmon et al., 1981). La loro influenza sulla entità emissioni è tale da consigliare lo sviluppo di modelli di emissione diversi per diverse tipologie di veicoli.

Data la complessità che consegue dall'influenza contemporanea delle variabili indipendenti presenti, è necessario individuare quelle di cui è necessario tenere conto in maniera esplicita nei modelli. Essi sono in prima approssimazione, la temperatura dell'aria esterna (che influenza la temperatura dei gas contenuti nel motore) e la pendenza longitudinale della via (la quale influenza la dinamica di funzionamento del motore).

I modelli di emissione sono sviluppati in maniera indipendente per ciascun tipo di inquinante e per ciascuna categoria veicolare di caratteristiche costruttive date. Essi sono inoltre costruiti come somma di diversi sottomodelli ognuno dei quali descrive la relazione tra le emissioni e un gruppo significativo di parametri. La dipendenza delle emissioni dalla dinamica di funzionamento del motore in determinate condizioni di regime – termico, di stato della meccanica e ambientale – costituisce il modello di base: le emissioni che in tal caso vengono calcolate saranno quindi indicate come *emissioni di base*. Le variabili indipendenti del modello di base sono quindi soltanto quelle relative alla dinamica di funzionamento dell'apparato di propulsione.

Le variazioni indotte da condizioni non di regime vengono computate come funzioni correttive del modello di base. Alle emissioni di base si aggiungono quindi le aliquote di emissioni dovute ai transitori termici del motore (emissioni a freddo), alla pendenza della via e allo stato non di regime della meccanica.

Lo sviluppo dei modelli può essere condotto sia con un approccio dinamico, volto alla simulazione delle caratteristiche istantanee del fenomeno, sia secondo un approccio statico che permette invece soltanto il calcolo dei valori medi delle emissioni nell'intervallo temporale al quale si riferisce l'analisi (fattori di emissione).

L'approccio dinamico conduce alla formulazione dei *modelli dinamici di emissione*. Essi consentono il calcolo delle emissioni istantanee di una determinata sostanza inquinante sulla base dell'andamento in funzione del tempo delle variabili indipendenti scelte. I modelli costruiti secondo questo approccio permettono di descrivere il fenomeno nel dettaglio, ma necessitano di una quantità notevole di informazioni sul comportamento istantaneo delle variabili esplicative. Essi trovano quindi campi ottimali di applicazione nella simulazione di configurazioni di complessità limitata.

L'approccio statico alla simulazione conduce a quelli che verranno indicati come *modelli statici di emissione*. Essi sono volti alla determinazione delle emissioni medie in un certo intervallo di tempo in funzione dei valori medi assunti dalle variabili indipendenti nell'intervallo considerato. Sono quindi adatti al calcolo delle emissioni in condizioni stazionarie di funzionamento del sistema di trasporto.

Esempi di campi di applicazione dei modelli statici sono l'analisi delle emissioni dovute a veicoli in condizioni di moto uniforme e di moto non uniforme ma caratterizzato dal valore della velocità media, come è il caso di traffico in condizioni di flusso ininterrotto.

L'andamento delle variabili che descrivono il moto dei veicoli è determinato da algoritmi di calcolo indipendenti che, sulla base dell'entità dei flussi di traffico e della geometria del sistema viario determinano le caratteristiche quantitative del moto (modulo di deflusso) (Nuzzolo et al., 1993). Nel caso più generale un modello di emissione fa quindi parte di un sistema di modelli comprendente un modulo di interazione domanda-offerta di trasporto (ripartizione modale, assegnazione dei flussi di traffico), un modulo di deflusso e infine il

vero e proprio modello di emissione. Questo fornisce le quantità totali di inquinante emesse da un generico flusso di veicoli nell'unità di spazio percorso o nell'unità di tempo, denominate fattore lineare di emissione e fattore temporale di emissione rispettivamente.

### 3.3.1 I modelli dinamici di emissione

I modelli dinamici di emissione sono generalmente costituiti dalla somma di un insieme di funzioni ognuna delle quali consente di determinare l'aliquota delle emissioni istantanee (esprese in massa di inquinante per unità di tempo) in funzione di un gruppo di variabili significative. Le funzioni di emissione di base sono generalmente diverse nei diversi modi cinematici, relativi a determinati ranghi di variazione della velocità e dell'accelerazione (Horowitz, 1982). Le condizioni dell'apparato di propulsione variano infatti in maniera discontinua tra modi diversi, determinando differenze notevoli tra i corrispondenti processi di produzione ed emissione degli inquinanti. Questi modelli sono anche detti *modelli modali* di emissione. Le funzioni di emissione di base, differenti nella forma o nei coefficienti non solo per ogni modo cinematico ma anche per ciascun inquinante considerato e a seconda della categoria veicolare alla quale esse si riferiscono, sono generalmente ricavate attraverso analisi di regressione basate su rilevamenti effettuati su veicoli in condizioni reali di funzionamento.

Fissate le caratteristiche costruttive del gruppo veicolare  $g$  e il tipo di inquinante  $i$ , il modello di base viene quindi sviluppato indipendentemente per ogni modo cinematico  $m$  di durata pari a  $t_m$ .

La massa totale di inquinante  $i$  emessa dal veicolo durante l'intero modo cinematico sarà quindi:

$$e_{base}^{i,g,m} = \int_0^{t_m} f_{base}^{i,g,m}(v(t), a(t)) dt \quad \text{Eq. (3.3)}$$

La determinazione del modello necessita a questo punto di misure sperimentali dei valori di  $e_{base}$  per differenti modi in funzione delle velocità e delle accelerazioni istantanee. In tal modo si possono stimare le funzioni base  $f_{base}$ , non note a priori, le quali costituiscono quindi il vero e proprio modello di previsione delle emissioni di base. Dalla conoscenza delle funzioni di base  $f_{base}$  è possibile calcolare le emissioni di un veicolo del gruppo  $g$  per un ciclo di guida noto e composto da un insieme di  $n_m$  modi:

$$e_{base}^{i,g} = \sum_{m=1}^{n_m} \int_0^{t_m} f_{base}^{i,g,m}(v(t), a(t)) dt \quad \text{Eq. (3.4)}$$

Il modello è poi completato da un insieme di funzioni correttive che forniscono un'aliquota supplementare di emissione per tenere conto delle variabili che non compaiono nel modello di base. come la pendenza longitudinale della via, il periodo di funzionamento a freddo del motore e le condizioni di stato della meccanica diverse da quelle di regime.

Le emissioni totali di inquinante  $i$  di un veicolo appartenente al gruppo  $g$  sono date dalla somma dei diversi contributi:

$$e^{i,g} = e_{base}^{i,g} + e_p^{i,g} + e_T^{i,g} + e_M^{i,g} \quad \text{Eq. (3.5)}$$

Stabilito il modello di emissione di un singolo veicolo, le emissioni dovute ad un flusso di veicoli di diverse caratteristiche costruttive si calcolano sommando i contributi dovuti ai vari gruppi veicolari. Se si suppone che tutti i veicoli si muovano secondo il medesimo cicli di guida, si indica con  $N$  il numero di veicoli appartenenti al flusso e con  $c_g$  la percentuale di veicoli del gruppo veicolare  $g$  presenti nel flusso, le emissioni totali espresse in unità di massa dovute al flusso saranno date da:

$$\varepsilon^i = \sum_{g=1}^{n_g} c_g \times N \times (e_{base}^{i,g} + e_p^{i,g} + \gamma_{tr} + e_M^{i,g}) \quad \text{Eq. (3.6)}$$

con:

- $c_g$  = % di veicoli del gruppo  $g$ ;
- $N$  = n° di veicoli appartenenti al flusso, supponendo che si muovano tutti con il medesimo ciclo di guida;
- $\gamma_{tr}$  = % di veicoli sottoposti a transitorio termico.

I modelli dinamici di emissione sono in genere utilizzati a modelli di deflusso molto dettagliati; essi necessitano infatti di dati sulle velocità e sulle accelerazioni istantanee dei veicoli e di dati sulla densità dei flussi di traffico che servono a riportare le emissioni dei singoli veicoli a emissioni degli interi flussi. Il modulo di deflusso è quindi in generale composto da un modello di coda, che permette il calcolo dei parametri delle code che si verificano in corrispondenza dei punti nodali della rete stradale (accessi con precedenza o semaforizzati) e da un modello di deflusso, che consente di conoscere le condizioni del moto in un qualunque punto dei singoli elementi della rete e che utilizza anche i risultati del modello di coda (Figura 3.7). Il risultato del modulo di deflusso è, nel caso più dettagliato, costituito da un insieme di cicli di guida che definiscono le condizioni operative del moto dei veicoli. Attraverso il modello di emissione istantaneo viene infine determinato- per ogni

strada della rete analizzata- il profilo di emissione, ovvero l'andamento temporale della quantità di inquinante che viene emessa nell'atmosfera.

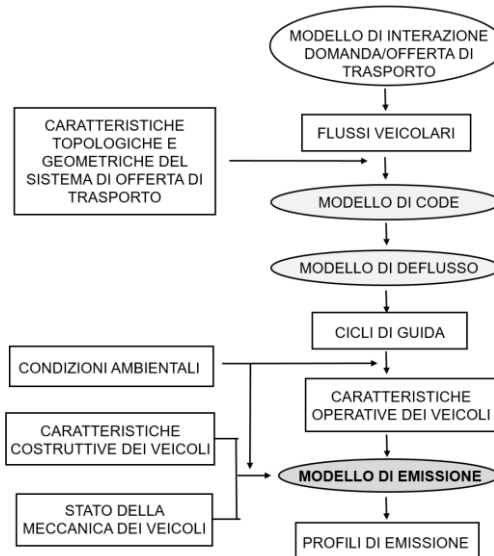


Figura 3.7 Schema di un modello dinamico di emissione

### 3.3.2 I modelli statici di emissione

La descrizione dinamica del fenomeno delle emissioni, essendo finalizzata alla stima istantanea della quantità di sostanze inquinanti emesse nell'atmosfera, non è adatta ad essere utilizzata in un processo di simulazione di tipo stazionario. Si rende pertanto necessario un approccio di tipo statico alla simulazione delle emissioni attraverso modelli che permettano il calcolo delle emissioni medie (fattori di emissione) nell'intervallo di tempo di riferimento. Queste ultime possono essere espresse, rispetto a tale intervallo, nella forma di emissioni totali o di emissioni per unità di lunghezza percorsa.

Il principale problema che deve essere risolto per operare questo tipo di approccio è l'individuazione delle variabili indipendenti di tipo statico da utilizzare nei modelli matematici per il calcolo delle emissioni, che può essere operato a partire dai risultati ottenuti nella precedente analisi dei modelli dinamici. Il passaggio delle variabili indipendenti di tipo dinamico a quelle di tipo statico riguarda solo quei gruppi di parametri che nell'approccio dinamico erano considerati dipendenti dal tempo.

Essi sono le caratteristiche cinematiche del moto- che determinano le emissioni di base- e le condizioni termiche del fluido evolvente.

Il calcolo delle emissioni statiche di base si fonda sulla dimostrazione che, sebbene l'influenza sui profili istantanei di emissione delle proprietà puntuali dei cicli di guida sia

notevole, i fattori totali di emissione sono invece esprimibili in funzione dell'unico parametro rappresentato dalla velocità media del moto (Tartaglia, 1995). La notevole correlazione che esiste tra l'entità delle emissioni globali e la velocità media dei veicoli è senza dubbio una proprietà importante del fenomeno dell'emissione. Essa permette infatti di esprimere con buona approssimazione, una volta fissate le caratteristiche del parco circolante e le condizioni al contorno, un legame funzionale tra l'entità delle emissioni inquinanti e le variabili che descrivono il comportamento medio del flusso di traffico.

I modelli statici esprimono le emissioni medie relative a un certo intervallo di tempo di riferimento in funzione dei valori medi delle variabili indipendenti esplicative.

Le aliquote di emissione che vengono generalmente computate in un modello statico comprendo le emissioni di base, le emissioni dovute al transitorio termico corrispondente agli spostamenti con partenza a freddo, gli incrementi di emissione dovuti ai cambiamenti della livelletta o a altre variazioni della resistenza al moto, quelli dovuti allo stato della meccanica e le emissioni evaporative (solo per gli idrocarburi volatili).

Le emissioni medie  $\delta E$  vengono espresse, per ogni veicolo considerato, in massa per unità di lunghezza percorsa. Anche in questo caso, come per i modelli dinamici, l'algoritmo di calcolo delle emissioni possiede caratteristiche diverse a seconda dell'inquinante considerato e dalla tipologia veicolare. Fissati questi due parametri, le emissioni di base vengono computate in funzione delle caratteristiche del moto le quali vengono rappresentate dalla velocità media dello spostamento.

Per ogni sostanza inquinante  $i$  di riferimento e ogni gruppo veicolare  $g$  considerato, le emissioni di base sono funzione della sola velocità media dello spostamento e sono eventualmente espresse in maniera diversa per fasce di velocità. Esse sono indicate come segue:

$$\delta E_{base}^{i,g}(v_m)$$

Le aliquote di emissione dovute alle variabili che compaiono nel modello di base sono poi computate come funzioni correttive.

L'incremento di emissione dovuto al funzionamento in transitorio termico può essere espresso in funzione della velocità media e di un certo numero di altre variabili  $x_1, \dots, x_n$  fra cui la frazione di spostamento mediamente percorsa con motore freddo, la temperatura ambiente e la lunghezza media degli spostamenti; questo incremento si indica con:

$$\delta E_T^{i,g}(v_m, x_1, \dots, x_n)$$

Fra le cause dell'esistenza delle emissioni aggiuntive rispetto a quelle di base vanno annoverate le variazioni della resistenza esterna al moto dovute alla pendenza longitudinale positiva  $p$  della via. Le sovraemissioni corrispondenti possono essere espresse in funzione della pendenza stessa e indicate con:



$$\delta E_p^{i,g}(p)$$

L'esistenza di uno stato della meccanica non di regime per il veicolo considerato, determina un'aliquota aggiuntiva di emissioni indicata con:

$$\delta E_M^{i,g}(p)$$

Un ultimo contributo di cui si può tenere conto è rappresentato, solo per gli idrocarburi volatili, dalle emissioni evaporative, che sono in genere considerate funzione di altre variabili  $y_1, \dots, y_n$  fra cui la temperatura ambiente media, le variazioni termiche, la volatilità del combustibile.

Queste emissioni vengono indicate con:

$$\delta E_{ev}^{HC,g}(y_1, \dots, y_n)$$

Le emissioni totali per unità di lunghezza di inquinante  $i$  dovuto a un flusso di traffico composto da  $N$  veicoli ripartiti in  $n_g$  gruppi di diverse caratteristiche costruttive secondo le percentuali  $c_g$  sono quindi uguali all'equazione seguente (Eq. 3.7):

$$E^i(v_m, x_1, \dots, x_n) = N \sum_{g=1}^{n_g} c_g (\delta E_{base}^{i,g}(v_m) + \delta E_T^{i,g}(v_m, x_1, \dots, x_n) + \delta E_p^{i,g}(p) + \delta E_{ev}^{HC,g}(y_1, \dots, y_n))$$

### 3.3.3 La metodologia COPERT

Un modello di calcolo, frequentemente utilizzato in Europa, per la stima delle emissioni di inquinanti atmosferici dovuti ai trasporti stradali è il COPERT (Computer Programme to calculate Emissions from Road Traffic) introdotto dall'EEA (European Environment Agency, Agenzia Europea per l'Ambiente).

Questa metodologia si basa sull'*Emission Factor Approach*, secondo il quale le emissioni di un dato inquinante relative ad un certo settore sono il prodotto delle singole attività che generano emissioni e dei rispettivi fattori di emissione. Dunque, le emissioni di traffico stradale vengono calcolate secondo la formula generale:

$$E = FE \cdot A \tag{Eq. (3.8)}$$

dove:

- $FE$  è il fattore di emissione, misurato solitamente in g/km e rappresenta la quantità di inquinante emessa per Km;
- $A$  è l'indicatore di attività, come la percorrenza calcolata dal modello di traffico.

Si tratta di un modello disaggregato, in quanto consente di ottenere i valori delle emissioni per ogni categoria veicolare. Esso si applica ad autovetture passeggeri ( $PCs$ ),

veicoli commerciali leggeri (*LDVs*), veicoli commerciali pesanti (*HVVs*), autobus (*Buses*), motocicli e ciclomotori (*Motorcycles* e *Mopeds*), suddivisi secondo 63 diverse categorie per classi di cilindrata, o portata, tipo di alimentazione, normativa di riferimento.

Consente la stima di tutti gli inquinanti regolamentati dalla normativa europea (CO, NOx, VOC, NMVOC, PM e CO<sub>2</sub>). Inoltre, permette il calcolo delle emissioni anche di alcuni inquinanti non regolamentati come CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, metalli pesanti, idrocarburi policiclici aromatici (IPA), inquinanti organici persistenti (POP) e, infine, è in grado di fornire le emissioni di NMVOC distinte nelle singole specie.

Riassumendo, la metodologia di calcolo del COPERT si basa sui seguenti parametri:

- Parco circolante suddiviso per:
    - *tipologia di veicolo* (numero di PCs, LDVs, HVVs, ecc.);
    - *tipo di combustibile utilizzato* (benzina, gasolio, GPL, ecc.);
    - *classe di anzianità*, in relazione alle normative europee di introduzione di dispositivi per la riduzione delle emissioni (Euro I, II, ecc.);
    - *classe di cilindrata* (per le autovetture) o *classe di peso* (per i veicoli commerciali);
  - Consumi e caratteristiche dei combustibili;
  - Condizione di guida:
    - *percorrenze medie annue*;
    - *velocità medie*.
- Sono entrambe distinte in base al ciclo di guida, cioè alla tipologia di percorso effettuato (urbano, extraurbano, autostradale).
- Fattori di emissione;
  - Pendenza della strada;
  - Condizioni climatiche:
    - *temperatura massima*;
    - *temperatura minima*;
  - Carico trasportato nel caso dei veicoli commerciali.

A parte i *fattori di emissione*, presenti nel codice di calcolo del programma, gli altri dati devono essere introdotti dall'utente durante la creazione del database di input.

Di solito, per ricavare i dati relativi al *parco circolante*, si ricorre all'ACI che esegue una distinzione dei veicoli in categorie di cilindrata/peso e data di immatricolazione (ACI, 2014).

I valori dei *consumi* annui di benzina, diesel e GPL sono riportati sul Bilancio Energetico Nazionale, redatto dal Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE, 2015).

Le *percorrenze medie annue* considerate dal modello COPERT e distinte per ciascuna tipologia di veicoli, rappresentano, di solito, il risultato di una analisi incrociata sviluppata in base a diverse fonti. Il riferimento principale è il Conto Nazionale dei Trasporti (Ministero

dei Trasporti); altre informazioni provengono dall'ACI, dall'Unione Petrolifera e dalla CONFETRA (Confederazione generale italiana del Traffico e dei Trasporti).

Per le *velocità medie* non è possibile identificare una fonte specifica. Tuttavia, analizzando diversi casi di studio e articoli di stampa specializzata, sono stati confermati i valori suggeriti dal modello.

Per le *distanze medie di spostamento* e i *tempi medi di spostamento* si può fare riferimento ai dati dell'AUDIMOB (osservatorio sui comportamenti di mobilità degli italiani).

Per quanto riguarda invece i *dati meteo* essi possono essere ricavati da diverse banche dati facilmente reperibili in rete (EUROMETEO).

A ciascuna classe veicolare e per ogni inquinante il modello COPERT associa delle funzioni di stima delle emissioni e dei consumi dipendenti dalla velocità. Tali funzioni rappresentano delle *curve medie di emissione* e di *consumo di carburante*; esse vengono ricavate da misure di emissioni per diverse tipologie e marche di veicoli e si riferiscono a prove effettuate in numerosi Paesi Europei, su una varietà di cicli di guida urbani ed extraurbani, inclusi quelli previsti dalle normative europee.

Le quantità complessive di sostanze emesse in atmosfera dai mezzi di trasporto su strada dipendono sia dalle emissioni specifiche dei singoli veicoli (*fattori di emissione*), che dalla *numerosità delle diverse flotte* (veicoli a benzina, diesel, GPL, veicoli catalizzati e non, ecc.) e dalle *relative percorrenze*.

Quindi, il programma COPERT stima le emissioni di una data categoria veicolare, a partire dalla curva di emissione "speed dependent", in seguito alla scelta di un valore di velocità media, considerato rappresentativo del relativo ciclo di guida (urbano, extraurbano, autostradale).

### **3.3.3.1 Calcolo dei fattori di emissione**

Un fattore di emissione dà una rappresentazione quantitativa delle caratteristiche emissive di un dato inquinante, in un certo anno per una data sorgente.

I fattori di emissione sono dipendenti dalla velocità media e sono specifici per:

- inquinante;
- velocità;
- tipo di veicolo;
- carburante;
- pendenza della strada;
- temperatura dell'aria ambiente;
- lunghezza dell'arco stradale;

- tipo di strada.

Il fattore di emissione di un inquinante, per una particolare categoria veicolare e per un particolare tipo di percorso o ciclo di guida, viene calcolato rapportando il corrispondente dato di emissione nazionale (stimato con il COPERT ed espresso in tonnellate/anno) al prodotto del numero di veicoli appartenenti a quella categoria per le relative percorrenze medie annue (esprese in km/anno):

$$FE_{ijk} = \frac{E_{ijk}}{(P_j \times Perc_{jk})} \quad \text{Eq. (3.9)}$$

con:

- $FE_{ijk}$  = fattore di emissione dell'inquinante  $i$ , per la categoria veicolare  $j$  sul percorso  $k$  (espresso in grammi per veicolo e per chilometro);
- $E_{ijk}$  = emissione totale dell'inquinante  $i$ , per la categoria veicolare  $j$  sul percorso  $k$  (espressa in tonnellate/anno);
- $P_j$  = numero di veicoli appartenenti alla categoria veicolare  $j$ ;
- $Perc_{jk}$  = percorrenza media annua del veicolo appartenente alla categoria  $j$ , effettuata sul percorso  $k$  (espressa in km/anno).

Gli  $FE_{ijk}$  così stimati sono dei valori "medi" ricavati dalla calibratura complessiva del modello. I fattori di emissione utilizzati sono, dunque, il prodotto della sintesi di un ampio insieme di esperienze disponibili a livello europeo.

### 3.3.3.2 Calcolo delle emissioni

Determinati i fattori di emissione per ciascuna classe veicolare, è possibile calcolare le emissioni totali di un determinato inquinante con la seguente formulazione:

$$E_i = EF_i \times N_i \times p_i \quad \text{Eq. (3.10)}$$

con:

- $p_i$  = lunghezza media dello spostamento medio annuale (in km) di ciascun veicolo della classe veicolare di emissione  $i$ ;
- $N_i$  = numero di veicoli che circolano annualmente appartenenti alla assegnata classe  $i$ .

In generale, emissioni da veicoli su strada si possono esprimere come la somma di tre tipologie di contributi:

$$E = E_{hot} + E_{cold} + E_{evap} \quad \text{Eq. (3.11)}$$

dove:

- $E_{hot}$  = emissioni “a caldo” (hot emissions), prodotte durante il funzionamento del motore alla temperatura di esercizio (circa 90°C), cioè quando il motore è stabilizzato termicamente;
- $E_{cold}$  = emissioni “a freddo” (cold over-emissions), prodotte nella fase di riscaldamento del motore. Comprendono quelle generate durante la partenza a temperatura ambiente e gli effetti del preriscaldamento.  
 Convenzionalmente, sono le emissioni che si verificano quando la temperatura dell’acqua di raffreddamento è inferiore a 70°C.
- $E_{evap}$  = emissioni evaporative costituite dai soli NMVOC (composti organici volatili non metanici), dovute all’evaporazione del combustibile.

Le emissioni a caldo sono stimate per tutte le tipologie di veicoli, le emissioni a freddo per i veicoli leggeri, quelle evaporative sono rilevanti solo per i veicoli a benzina.

Dato che diverse situazioni di guida comportano differenti condizioni di funzionamento del motore (quindi differenti tipologie di emissione), il modello COPERT considera anche tre differenti condizioni di guida che avvengono su percorsi urbani, rurali e autostradali.

L’equazione precedente può essere perciò riscritta anche nel seguente modo:

$$E = E_{urban} + E_{rural} + E_{highway} \quad \text{Eq. (3.12)}$$

con  $E_{urban}$ ,  $E_{rural}$ ,  $E_{highway}$  = emissione di inquinanti nelle rispettive condizioni di guida.

Infine, risulta di grande importanza l’applicazione di correzioni, finalizzata ad ottenere degli output sempre più coerenti con la realtà. Le *emission corrections* tengono conto degli effetti sugli scarichi dei seguenti parametri:

- *migliori combustibili*: la simulazione dell’effetto sulle emissioni avviene per mezzo di un fattore di correzione funzione del tipo di combustibile e del tipo di veicolo;
- *età del veicolo*: si associa un certo fattore di degradazione, in funzione della vita media dei veicoli;
- *manutenzioni e ispezioni intensificate*: il modello ne tiene conto correggendo il fattore di degradazione;
- *effetto della pendenza della strada sui veicoli pesanti*: le correzioni applicate dipendono dalla massa veicolare, dalla velocità media, dal gradiente stradale e dal tipo di inquinante;

- *carico degli heavy vehicles*: l'influenza del carico sull'emissione viene simulata considerando un carico aggiuntivo del 50%.

# CAPITOLO 4

## METODOLOGIA

### 4.1 Sviluppo dell'architettura del sistema ITS

L'architettura telematica del sistema ITS è basata su una serie di componenti utili a perseguire degli obiettivi specifici inerenti il settore dei trasporti e in particolare la "mobilità intelligente".

L'architettura di questo sistema è stata realizzata a partire da un insieme di requisiti (User Needs) che rappresentano le necessità dei soggetti interessati che a loro volta interagiscono con il sistema di trasporto. Si tratta di una struttura che identifica gli attori, i bisogni, le funzioni, le caratteristiche e le sussistenti relazioni fra questi elementi a supporto della mobilità. Essa definisce quindi l'insieme dei servizi necessari, delle relazioni funzionali e delle caratteristiche individuate a partire dalle esigenze di tutti gli attori del sistema.

La struttura di base dell'architettura è composta sostanzialmente da cinque elementi:

1. un modello concettuale;
2. un'architettura logico/funzionale;
3. un'architettura fisica;
4. un'architettura di comunicazione;
5. un'architettura organizzativa.

Questa struttura è comune a tutte le architetture ITS e può essere sviluppata favorendo particolari funzioni piuttosto che altre. La disponibilità di un tale tipo di architettura fornisce dei benefici quali:

- progettare un sistema in grado di rispondere ai requisiti richiesti;
- correlare i requisiti con i servizi e le funzionalità del sistema garantendone la tracciabilità nel progetto;

- favorire l'eliminazione delle ridondanze presenti e semplificare i servizi e le funzionalità offerte, assicurando la consistenza delle informazioni;
- permettere di progettare sistemi con un elevato livello di indipendenza tecnologica;
- semplificare l'implementazione e la gestione del sistema;
- supportare e agevolare una rappresentazione schematica condivisa da tutti i soggetti interessati mediante la progettazione di un sistema integrato con interfacce standard tra le componenti.

Nello specifico, l'obiettivo è quello di realizzare un centro di monitoraggio e controllo del traffico real-time e un servizio di infomobilità. In tal modo è stato possibile individuare i requisiti richiesti ed inquadrare tutte le funzionalità di questo sistema telematico per i trasporti.

### 4.1.1 Modello concettuale

Il punto di partenza per la costruzione dell'architettura del sistema ITS è la definizione del modello concettuale rappresentativo del sistema operante su scala urbana.

Prima di tutto, partendo dall'analisi del sistema dei trasporti e dallo stato di fatto della mobilità del traffico privato nell'area di studio, sono stati individuati gli User Needs o Requisiti Utente correlati a questo sistema, sulla base delle funzioni che quest'ultimo deve integrare:

- acquisizione Real-Time di misure provenienti dalla strada (sia da sensori fissi che provenienti da Floating Car Data);
- simulazione Real-Time dello stato di tutta la rete di competenza (anche della parte non direttamente monitorata);
- supporto alle decisioni per l'individuazione e messa in atto di opportune politiche di controllo e gestione del traffico;
- servizio all'utenza attraverso l'applicazione automatica real-time di sistemi informativi quali pannelli a messaggio variabile, portale web e cerca-percorso dinamico multimodale.

Questa prima fase è risultata molto utile per l'individuazione degli obiettivi generali del progetto da realizzare.

Si è proceduto, quindi, con la valutazione dei collegamenti che tale progetto ha con l'esterno. A tal proposito sono stati individuati i cosiddetti *terminatori*.

Con questo termine si indica il collegamento esistente fra l'architettura e il mondo esterno, definendo in qualche modo i confini del sistema stesso (Figura 4.1). Esso indica cosa il mondo esterno può fare per il sistema e di cosa può aver bisogno da esso. Un terminatore



può essere rappresentato, quindi, da una persona, un sistema o un'entità fisica da cui si possono ottenere le informazioni e i dati necessari.

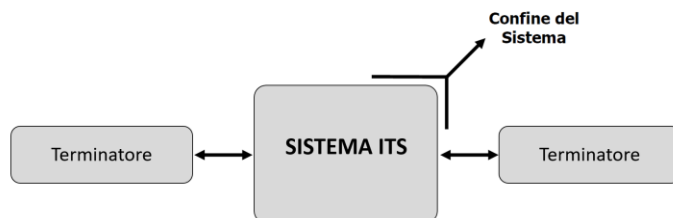


Figura 4.1 Schema semplificato di un diagramma di contesto

Nel caso del sistema ITS, il terminatore è rappresentato dall'ambiente esterno nel quale le componenti del sistema della mobilità – infrastruttura, veicoli, utenti ed ambiente – interagiscono tra loro. Si è stabilito in tal modo il confine del sistema mediante il *diagramma di contesto* rappresentato in Figura 4.2 che mostra il rapporto fra il sistema stesso e le parti dell'ambiente esterno con le quali interagisce, cioè i terminatori.

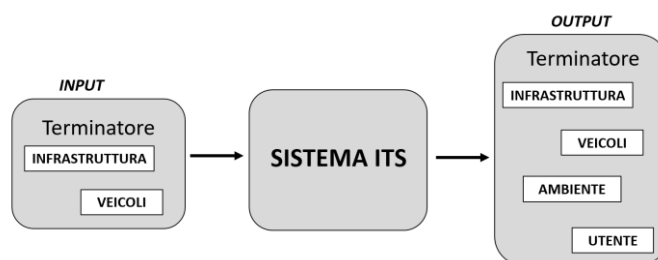


Figura 4.2 Diagramma di contesto del Sistema ITS

Considerando ad esempio il terminatore veicolo si hanno due relazioni: la relazione “From Vehicle” e la relazione “To Vehicle” (Figura 4.3).

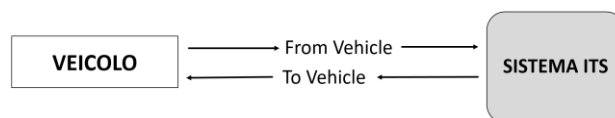


Figura 4.3 Relazione Traffico – Sistema ITS

La relazione “From Vehicle”, dal terminatore al Sistema, indica la presenza di un flusso di dati che contiene indicazioni sulla presenza di veicoli che sono tracciati mediante sensori interni al veicolo; quindi si tratta di informazioni trasmesse dai veicoli stessi al sistema, ossia dal mondo esterno al Sistema.

La relazione “To Vehicle”, dal Sistema al terminatore, indica la presenza di un flusso di dati inviati dal Sistema che gestisce la rete stradale, al veicolo e, quindi, in questo caso si tratta di informazioni trasmesse dal Sistema al mondo esterno.

A questo punto si è proceduto con la definizione dell’architettura logico-funzionale, di quella fisica ed infine dell’architettura di comunicazione.

### 4.1.2 Architettura logico-funzionale

L’“architettura logica” rappresenta i collegamenti esistenti tra i terminatori e le funzioni: si tratta di uno schema a blocchi che permette di individuare gli archivi dati e i flussi logici necessari per realizzare i requisiti utente prefissati (

Figura 4.4).

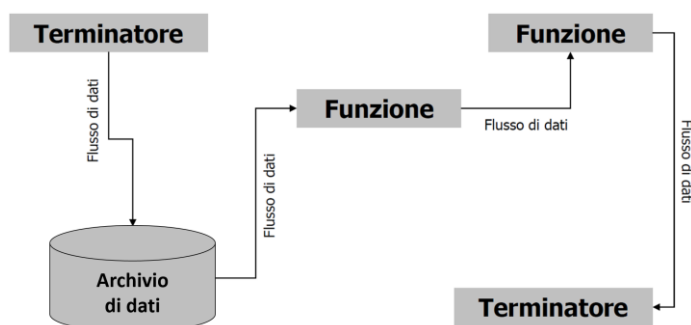


Figura 4.4 Modello semplificato di architettura logico/funzionale

Gli steps seguiti per la definizione dell’architettura del sistema ITS sono stati i seguenti:

- individuazione degli ambiti dei quali si caratterizza il sistema;
- individuazione dei flussi logici e dei data store;
- individuazione delle funzioni necessarie per il soddisfacimento dei requisiti.

Per la realizzazione del sistema ITS sono state definite le funzioni, raggruppate per aree funzionali, e i flussi logici necessari al sistema per erogare i servizi in grado di soddisfare i requisiti definiti dai gestori e dagli utenti del sistema di trasporto. Dunque, a partire dalle funzioni selezionate sono stati individuati i flussi logici e i “data store”, cioè gli archivi, legati alla realizzazione del sistema.

La struttura logico-funzionale del sistema ITS messa a punto ha una struttura di tipo ciclica, dove perciò terminatore iniziale e terminatore finale coincidono. Questo unico terminatore è rappresentato dall’ambiente esterno, all’interno del quale le componenti di traffico, infrastruttura, veicoli, utente ed ambiente interagiscono tra loro.

In considerazione della complessità del sistema ITS da realizzare, la molteplicità di funzioni ad esso associate sono state raggruppate per aree funzionali, individuando così 3 funzioni:

- Funzione F1: Rilievo dati;
- Funzione F2: Gestione traffico;
- Funzione F3: Infomobilità.

Per la funzione F1 di rilievo si hanno le seguenti sotto-funzioni:

- F1.1 Conteggio veicolare automatico, mediante sensori di tipo radar;
- F1.2 Rilievo con sensori mobili basati sulla tecnologia FCD (Floating Car Data).

La funzione F2 è invece caratterizzata da:

- F2.1 Centrale operativa del traffico tramite la quale è possibile gestire e monitorare in remoto le periferiche installate in campo, effettuare stime di traffico in tempo reale, calcolare previsioni di traffico tenendo in considerazione l'effetto di eventuali eventi anomali, realizzare un database storico mediante l'archiviazione di dati di traffico;
- F2.2 Simulazione di scenari e gestione delle emergenze;
- F2.3 Monitoraggio ambientale con mappatura delle emissioni inquinanti (CO, NOx, HC, CO<sub>2</sub>, PM, FC) per ogni arco della rete con procedura di ri-calcolo ad ogni simulazione.
- F2.4 Re-indirizzamento con PMV;
- F2.5 Regolazione degli accessi e zone a traffico limitato;

Infine la funzione F3 di infomobilità si compone delle seguenti sottofunzioni:

- F3.1 Portale web destinato all'utenza per informazioni in tempo reale sullo stato del traffico attuale e futuro e sulla presenza di eventi di viabilità quali lavori in corso, code, incidenti, ecc., conoscenza dei livelli di accessibilità ad aree specifiche ed informazioni sui POI (Point of Interest);
- F3.2 Cerca-percorso multimodale dinamico in grado di effettuare un calcolo dinamico del percorso minimo con tempi di percorrenza e costi variabili nel tempo, per permettere di effettuare delle scelte multimodali di trasporto (auto, motociclo, autocarro, autobus, metropolitana, tram, bicicletta, treno, taxi, pedone) ed adottare soluzioni intermodali sfruttando qualsiasi scambio fattibile tra i diversi mezzi di trasporto;
- F3.3 Informazioni dinamiche all'utenza mediante PMV relativamente al traffico e all'informazione pubblica.

Per completare l'architettura sono stati individuati, infine, due differenti data store fra i quali viene operata una trasmissione dati continua ed in tempo reale (Figura 4.5).

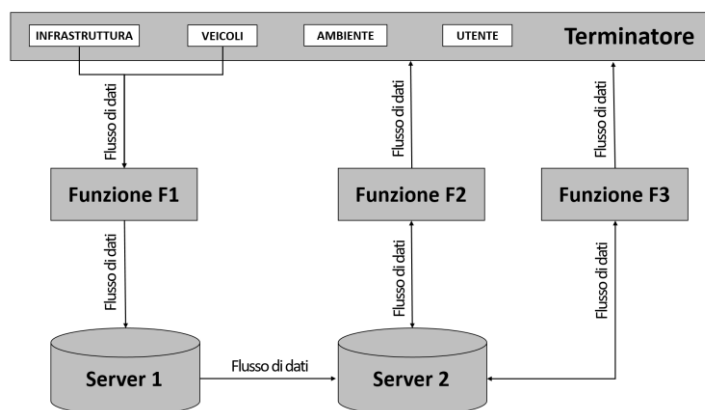


Figura 4.5 Architettura logico-funzionale del Sistema ITS

Il ciclo di funzionamento di questa architettura ha origine dal terminatore, e più specificatamente dalle sue due componenti infrastruttura e veicoli parte un flusso di dati che viene attratto dalla funzione di rilievo F1. Il flusso di dati rilevato viene convogliato all'interno del data store 1 (identificato con il nome di Server 1), il quale trasferisce in real-time e ad intervalli continui i dati al data store 2 (identificato con il nome di Server 2). A questo punto, si genera un flusso di dati di interscambio tra il server 2 e le due funzioni F1 e F2. La funzione F2 di gestione del traffico ha così a disposizione i dati per simulare le stime e previsioni di traffico nonché le emissioni ad esso associate, fornendo un supporto alle decisioni in fase di pianificazione e permettendo di individuare determinate strategie di gestione del sistema; mentre la funzione F2 di infomobilità attinge le informazioni che, filtrate opportunamente, risultano essere utili all'utente per compiere scelte di mobilità ottimizzate. In questo modo così si chiude il ciclo.

### 4.1.3 Architettura fisica

L'architettura fisica consente l'individuazione del "diagramma fisico" fornendo una collocazione fisica ai blocchi funzionali definiti dall'architettura logica. Essa permette quindi di muoversi dall'ambito funzionale o processo (astratto) verso il sistema (reale).

Le funzioni precedentemente individuate possono essere raggruppate secondo diversi criteri, come ad esempio:

- omogeneità operativo/funzionale e organizzativa delle funzioni: raggruppando tra loro le funzioni che contribuiscono allo stesso "macro servizio" (ossia alla stessa funzione di livello superiore). In modo analogo si può ragionare rispetto ai ruoli di competenza delle funzioni e quindi raggruppare tutte quelle che ricadono sotto la responsabilità dello stesso ruolo;

- ottimizzazione dei flussi informativi di scambio: raggruppando tra loro le funzioni per ridurre al minimo i flussi dati scambiati tra raggruppamenti differenti; in tal modo, ricordando che ad ogni raggruppamento corrisponde un diverso stato fisico, di riduce, di fatto, il carico delle interfacce di comunicazione;
- efficacia operativa: raggruppando le funzioni in relazione a dove presumibilmente sono localizzati i dispositivi di elaborazione, memorizzazione, gestione o attuazione.

Ciascuna localizzazione fisica costituisce un sottoinsieme che può contenere, dunque, una o più funzioni (Figura 4.6):

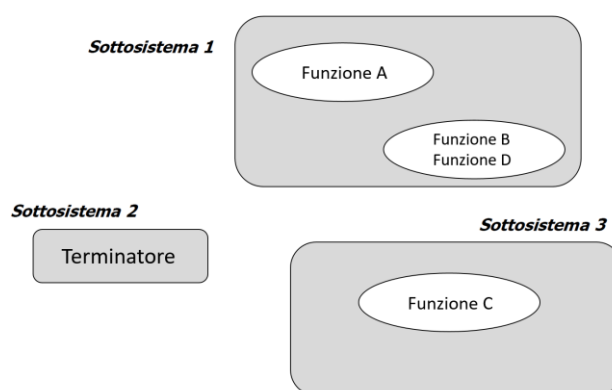


Figura 4.6 Modello semplificato di architettura fisica

I passi procedurali per la composizione di questa architettura sono stati i seguenti:

- identificazione del diagramma fisico;
- quantificazione dei macro-flussi di dati ed eventuale raggruppamento delle funzioni;
- assegnazione delle funzioni dell'architettura logica ai "siti";
- analisi delle necessità di comunicazione;
- definizione delle interfacce di comunicazione tra i siti.

L'individuazione dei siti fisici può prevedere differenti localizzazioni fisiche, quali:

- O = Sede Operatore: questo sito è rappresentato dalla sede fisica nella quale sono localizzati gli uffici tecnico-operativi, i dispositivi informatici a supporto, il personale della società che si occupa della fornitura dei servizi (provider-operatore);
- INF = Infrastruttura: questo sito è rappresentato dalla sede fisica, presso l'infrastruttura di trasporto, nella quale sono erogati alcuni servizi con dispositivi di comunicazione front-end, non disponibili cioè presso il domicilio dell'utente ma soltanto presso apposite strutture localizzate all'interno della sede fisica in cui viene erogato il servizio di trasporto ("bordo strada");
- SSG = Sede Società di Gestione: questo sito è rappresentato dalla sede fisica nella quale sono localizzati gli uffici tecnico-operativi, i dispositivi informatici, il personale di quelle società addette alla gestione operativa dei servizi;

- SSP = Sede Società di Pianificazione: questo sito è rappresentato dalla sede fisica nella quale sono localizzati gli uffici tecnico-operativi, i dispositivi informatici, il personale di quelle società addette alla pianificazione dei singoli servizi offerti ed alla programmazione di nuovi servizi;
- C = Organismi di Controllo: questo sito è rappresentato dalla sede fisica nella quale sono localizzati gli uffici tecnico-operativi, i dispositivi informatici a supporto, il personale, di quegli enti e quelle società addette al controllo della gestione dei servizi ed al rispetto delle leggi in vigore;
- T = Sede Organizzatore Trasporto e Ciclo logistico: questo sito è rappresentato dalla sede fisica nella quale sono localizzati gli uffici dell'Organizzazione del Trasporto e del Ciclo Logistico.
- U = Sede Utente: questo sito è rappresentato dalla sede fisica dell'utente, il luogo cioè dal quale l'utente utilizza un servizio a domicilio fornito dal sistema (stipula di un contratto, servizio informazioni, assistenza, servizi on-line, ecc.); tale luogo ovviamente non è rappresentato dalla sede fisica nella quale è svolto o erogato il servizio ma dalla sede propria dell'utente, abitazione privata, ufficio, ecc.
- BV = Bordo Veicolo: questo sito è rappresentato dal mezzo con cui viene eseguito lo spostamento di persone o di merci, il quale eroga o nel quale sono erogati alcuni servizi utilizzando dispositivi di comunicazione e di interfaccia utente.
- F = Organizzazione Finanziaria: questo sito è rappresentato dalla sede fisica nella quale sono localizzati gli uffici tecnico-operativi, i dispositivi informatici a supporto, il personale, di quelle società che si occupano della fornitura di servizi finanziari.
- P = Piattaforma Multimodale: una piattaforma multimodale va intesa come un'area destinata all'interscambio modale (nei terminali intermodali per il trasporto combinato strada-rotaia oppure per container), allo svolgimento di operazioni di trasporto e logistica – incluse quelle di deposito delle merci e delle UTI (negli interporti o nei centri merci) – oppure ad entrambe le attività (nei centri merci). A tal fine essa comprende le seguenti funzionalità: la gestione del territorio e degli impianti tecnologici, il controllo degli accessi ed uscite, degli arrivi e partenze dall'area di differenti mezzi di trasporto, il tracciamento delle attrezzature di movimentazione nei piazzali e nelle banchine, la prenotazione degli spazi su differenti mezzi di trasporto, la gestione dei documenti, nonché di tutte le operazioni logistiche connesse.

Nel caso del sistema ITS messo a punto, sono stati individuati quattro siti fisici, rispettivamente identificati con sottosistema 1, sottosistema 2, sottosistema 3 e sottosistema 4 (Figura 4.7).

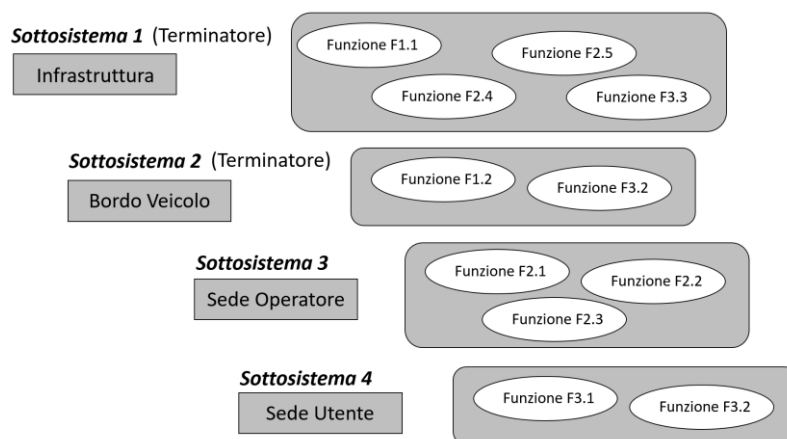


Figura 4.7 Architettura fisica del Sistema ITS

Il sottosistema 1 è rappresentato dall'Infrastruttura di trasporto, presso la quale risulta installato il livello periferico del sistema ITS. Più specificatamente, i sensori per la rilevazione in campo dei flussi (funzione F1.1) e i pannelli a messaggio variabile per il re-indirizzamento e regolazione del traffico (funzioni F2.4 e F2.5) e per l'informazione all'utenza (funzione F3.3).

Il sottosistema 2 è, invece, il Bordo Veicolo. In questo sito fisico si esplicano le funzioni di rilevamento mobile (funzione F1.2) e di informazione dinamica all'utenza (funzione 3.2) mediante l'installazione a bordo di opportuni dispositivi.

Il sottosistema 3 è rappresentato dalla Sede Operatore (laboratorio di pianificazione dei trasporti dell'Università), nella quale è stata installata la parte hardware del sistema centrale ed implementata la parte software di gestione remota ed elaborazione dati. Al suo interno ci sono quindi le funzioni di gestione del traffico e in particolare di monitoraggio, stima e previsione del traffico (funzione F2.1), di simulazione di scenari (funzione F2.2) e di monitoraggio ambientale (F2.3).

Infine, il sottosistema 4 è rappresentato dalla sede Utente, nella quale vengono erogati i servizi di informazione (funzione F3.1) e di routing dinamico (funzione F3.2).

#### 4.1.4 Architettura di comunicazione

Le potenziali tecnologie e reti di comunicazione adottabili tra i siti fisici possono essere molteplici: reti fisse, reti mobili, reti radiomobili, scambio elettronico dei dati, identificazione automatica, localizzazione automatica, raccolta dati di traffico e classificazione automatica, banche dati cartografiche e sistemi informativi territoriali.

Nel caso del sistema ITS, sono state individuate 5 interfacce di comunicazione (Figura 4.8).

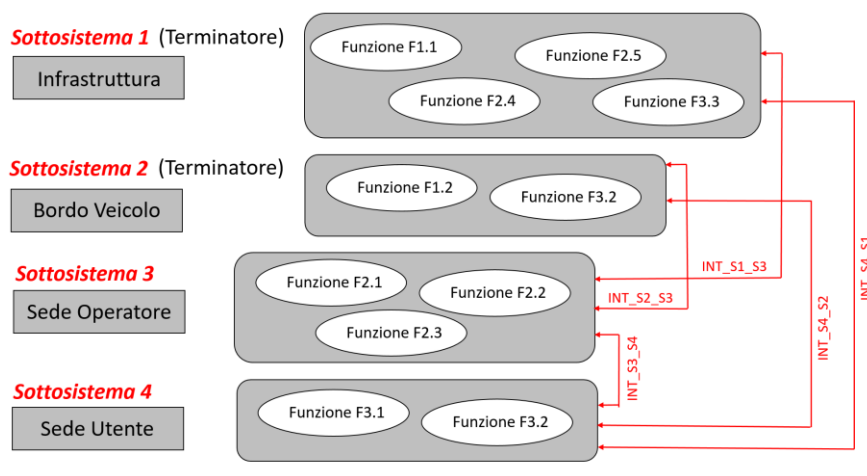


Figura 4.8 Architettura di comunicazione del Sistema ITS

Nello specifico, i due sottosistemi appartenenti al terminatore, e quindi l'Infrastruttura e il Bordo Veicolo si interfacciano con il sottosistema 3, rappresentato dalla Sede Operatore mediante due interfacce che per convenzione sono indicate con INT\_INF\_O e INT\_BV\_O. Tra il sottosistema 3 e il sottosistema 4, si ha una interfaccia di comunicazione tra il sito fisico Operatore e il sito fisico Utente indicata con la seguente nomenclatura INT\_O\_U. Infine, dal sottosistema 4 si hanno due ulteriori interfacce di collegamento con il terminatore, l'interfaccia INT\_U\_INF con il sottosistema 1 e l'interfaccia INT\_U\_BV con il sottosistema 2 (Figura 4.9).

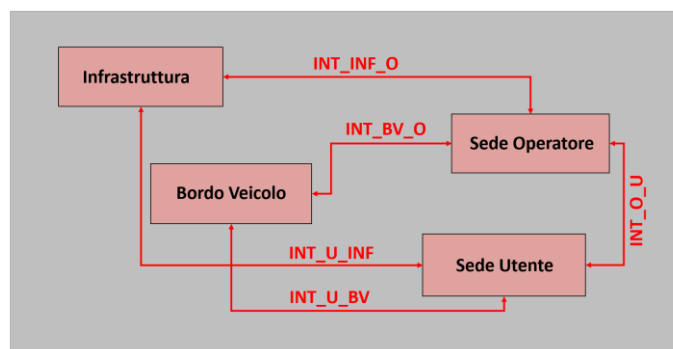


Figura 4.9 Nomenclatura delle interfacce del Sistema ITS

Queste interfacce si avvalgono di tecnologie basate su rete mobile. Nello specifico, i dati di traffico rilevati vengono inviati in tempo reale al sistema centrale mediante una rete wireless GPRS (General Packet Radio Service). Questa comunicazione permette di poter gestire da remoto le periferiche in campo e la trasmissione continua dei dati consente di effettuare simulazioni in tempo reale, correggendo continuamente le stime e previsioni.



Attraverso poi uno scambio continuo con i server mediante protocollo DATEX, i dati provenienti dalla centrale di controllo vengono utilizzati per gestire l'infrastruttura e per fornire informazioni all'utenza.

### 4.1.5 Architettura organizzativa

L'interoperabilità dei sistemi, oltre che dall'integrazione delle tecnologie con standard e specifiche tecniche, è rappresentata dall'accordo fra gli attori in campo. È necessario, quindi, progettare anche un'architettura organizzativa, al fine di coinvolgere e far collaborare tra loro diversi attori per garantire un servizio più efficiente e più completo possibile.

A tal riguardo, è stato individuato un primo disegno dell'insieme dei processi/funzioni di alto livello in grado di portare all'erogazione dei servizi in questione. Il macroprocesso rappresentato in Figura 4.10 rappresenta la formalizzazione dei passi fondamentali eseguiti per la realizzazione del sistema ITS e la fruizione dei servizi ad esso associati. Le attività (value activities) che lo compongono sono le seguenti:

- misura ed acquisizione dei dati;
- elaborazione del contenuto informativo;
- gestione della rete stradale;
- predisposizione dei servizi informativi;
- diffusione dei servizi.



Figura 4.10 Macroprocesso del Sistema ITS

Successivamente, costruito il macroprocesso, per strutturare l'architettura organizzativa del sistema ITS si è proceduto in tal modo:

- identificando il flusso delle attività;
- definendo le responsabilità per ciascun ruolo;
- attribuendo per ogni ruolo delle leve di gestione di natura economica, politica, giuridica e tecnologica, ma anche capacità professionali e forza lavoro;
- identificando gruppi di attività omogenee al fine di definire i ruoli coinvolti nell'erogazione dei servizi.

È stata dunque effettuata un'analisi dei soggetti interessati dalla realizzazione del sistema e dalla fruizione dei servizi da esso erogati: autorità pubbliche, gestori dell'infrastruttura, società di gestione, aziende produttrici, utenti finali. Per ciascuno di essi sono state attribuite le spettanti responsabilità di natura istituzionale normativa – per la definizione del quadro normativo /procedurale che governa l'ambito dei servizi in esame –, di natura gestionale – in termini di corretta gestione delle leve aziendali per determinare il valore atteso dal sistema –, di natura commerciale – al fine di fornire i servizi e i prodotti richiesti dal mercato nella maniera congruente al progetto ed alle aspettative dell'utenza – ed infine di delivery – in termini di erogazione dei servizi e prodotti in linea con i livelli di servizio e qualità determinati in sede contrattualistica.

Questa architettura organizzativa offre quindi una metodologia per leggere i servizi e le funzionalità definite dall'architettura logica in un'ottica di business e creazione del valore.

## **4.2 Struttura dei sistemi di monitoraggio e misure di traffico**

La fase di monitoraggio e di rilievo delle misure di traffico costituisce una parte primaria per la realizzazione del sistema ITS. In generale, il funzionamento dei dispositivi di rilievo è quello di acquisire i dati, immagazzinarli all'interno di un database e trasferirli ad un sistema centrale per successive elaborazioni.

I dati di traffico rilevati provengono da due diverse fonti: conteggio veicolare automatico mediante sensori di traffico installati in campo basati su tecnologia radar e acquisizione dati da sensori mobili FCD (Floating Car Data). Ovviamente, la tipologia di dati varia in funzione della tecnologia utilizzata.

Nei due paragrafi successivi verrà illustrata la metodologia eseguita per la realizzazione degli schemi di monitoraggio dei due sistemi e saranno esposti i principi di conteggio delle diverse tecnologie.

### **4.2.1 Conteggio veicolare automatico**

L'architettura del sistema di monitoraggio automatico utilizzato è costituita in linea di principio dalle seguenti componenti:

- un *sensore*, dispositivo costituito da materiale sensibile alla grandezza descrittiva del fenomeno, in grado di emettere un segnale in corrispondenza di una variazione del valore della grandezza;

- un *rilevatore* o *apparecchio di misura*, dispositivo 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.

Con riferimento al sistema ITS, la tecnica di monitoraggio automatico si basa sulla rilevazione delle perturbazioni indotte dal passaggio veicolare sull'ambiente circostante, sfruttando il fenomeno fisico dell'effetto Doppler (radar).

Le specifiche metodologiche prese in considerazione per la realizzazione di tale sistema di monitoraggio sono state le seguenti:

- localizzazione e caratterizzazione posizione di rilievo;
- dati da rilevare;
- modalità di rilievo;
- frequenza temporale di osservazione;
- livello di disaggregazione della misura;
- condizioni di funzionamento;
- frequenza di trasmissione ed accentrimento del dato in centrale.

Le sezioni di rilievo sono state posizionate in modo da non risentire delle perturbazioni indotte da svincoli, incroci, piazzole di sosta, ecc., e osservare condizioni di flusso ininterrotto con una frequenza temporale di osservazione continua.

Gli apparati di rilievo per effettuare il monitoraggio continuo sono di tipo non intrusivo (collocati su supporti a lato della strada) e di tipo radar.

I dati da rilevare riguardano:

- il passaggio  $p$  relativo al transito del veicolo in corrispondenza della sezione analizzata;
- la classificazione  $k$ ;
- la velocità di transito  $v$ ;
- l'istante di rilevamento (gg/mm/aa);
- la lunghezza del veicolo  $l$ ;
- l'headway temporale (testa-testa o coda-coda) rispetto al veicolo precedente;
- presenza di coda in corrispondenza del sensore.

Questi dati vengono inviati al sistema centrale mediante trasmissione per pacchetti di dati ogni 5 minuti ed eventuali pacchetti di dati non trasmessi per problemi tecnici sono conservati in locale per una nuova trasmissione non appena possibile.

Nello specifico, i dispositivi sfruttano 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. Inoltre, essi sono costruiti in modo da effettuare una duplice misura, in

corrispondenza dei due sensori che li caratterizzano, e rilevare in questo modo, oltre alla velocità, anche la classificazione veicolare.

Il dispositivo, posizionato in corrispondenza di una sezione stradale definita *sezione di controllo*, 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  $T$ :

$$q = \frac{n}{T} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

Nel caso dei dispositivi utilizzati dal sistema ITS, vengono eseguite due rilevazioni in due sezioni consecutive, effettuate tramite i due sensori collegati allo stesso dispositivo di elaborazione, che 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.

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

$$t_i = t_{2i} - t_{1i} \quad \text{Eq. (4.2)}$$

Noto il tempo  $t_i$  è possibile ricavare la velocità di percorrenza del veicolo mediante la seguente espressione:

$$v_i = \frac{L}{t_i} \quad \text{Eq. (4.3)}$$

dove  $L$  rappresenta la distanza tra i due sensori del dispositivo.

Infine, per quanto riguarda la classificazione veicolare  $k$ , eseguita sulla base della lunghezza del veicolo, sono state individuate 8 differenti classi:

1. Classe 0 – Conteggio (non classificato);
2. Classe 1 – Moto;
3. Classe 2 – Auto;
4. Classe 3 – Veicoli commerciali leggeri;
5. Classe 4 – Veicoli commerciali pesanti;
6. Classe 5 – Autobus;
7. Classe 6 – Autoarticolati;
8. Classe 7 – Autotreni;
9. Classe 8 – Trasporto eccezionale.

A partire da queste misure è possibile effettuare le stime delle variabili del deflusso veicolare ed applicare quindi i modelli di analisi e di regolazione del traffico.

A questa tipologia di rilevamento automatica 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.

### 4.2.2 Rilievo con sensori FCD

Le componenti tecnologiche del sistema di monitoraggio del traffico con sensori mobili basato su tecnologia FCD sono le seguenti:

- un dispositivo di rilevamento della posizione (GPS);
- un dispositivo di trasmissione (telefono cellulare);
- un sistema centrale di elaborazione che si interfaccia con l'ambiente esterno.

Il sistema è caratterizzato dallo scambio di informazioni tra la flotta di veicoli e il sistema centrale di elaborazione dei dati: i veicoli, che fungono da clients, inviano periodicamente i dati recentemente accumulati su posizione e velocità istantanea al server che gestisce il 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, sommati 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.

Sull'infrastruttura stradale, composta da archi, si muove dunque un'aliquota 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 attraverso una robusta e fitta rete di comunicazione. Utilizzando dati di posizione provenienti dal GPS, i veicoli aggiornano ricorsivamente le stime della propria posizione sull'infrastruttura.

I dati comunicati alle stazioni contengono l'identificativo del veicolo, la posizione, la velocità media e il tempo medio di percorrenza impiegato per attraversare l'arco precedente a quello su cui si trova il veicolo al momento della trasmissione. L'affidabilità delle stime dei

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.

Queste informazioni sono a loro volta utilizzate dal sistema centrale per conoscere la configurazione della rete, elaborare stime e previsioni dei tempi di percorrenza e delle velocità di differenti percorsi che possono essere fornite agli utenti.

Una rappresentazione schematica dello scenario di stima e previsione è fornita in Figura 4.11.

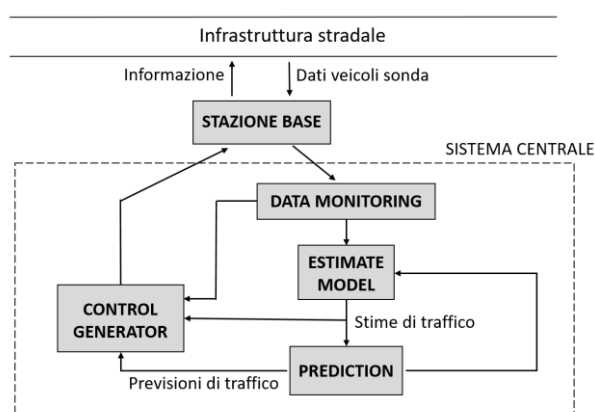


Figura 4.11 Schematizzazione del sistema di monitoraggio e controllo

L'adozione delle tecniche FCD rappresenta dunque una via efficace per raggiungere stime accurate dei tempi di percorrenza in una rete stradale, consentendo inoltre di prevedere ed aggiornare la conoscenza sulle condizioni di traffico nel breve termine, rilevare automaticamente incidenti o situazioni critiche e determinare flussi origine-destinazione.

### 4.3 Stima e previsione del traffico in real-time

La procedura per la stima e previsione del traffico in real-time eseguita dal sistema ITS è stata realizzata mediante l'utilizzo congiunto di sistemi hardware rappresentati da sensoristica per il rilievo del traffico stradale e di sistemi software per le elaborazioni dati e i processi di simulazione.

L'elaborazione del contenuto informativo proveniente dalla fase di monitoraggio consiste nell'accesso ai dati raccolti allo scopo di:

- ottenere dati derivati;

- integrare le osservazioni con ulteriori fonti complementari;
- realizzare estensioni spaziali e proiezioni temporali;
- verificare/validare la qualità dei dati allo scopo di migliorarne l'affidabilità.

I soggetti gestori delle strade sono tenuti all'elaborazione del contenuto informativo dei rilievi e delle misure di traffico, nonché alla loro storicizzazione, alla realizzazione dell'estensione temporale con stime e previsioni almeno nel breve termine, alla validazione della qualità dei dati raccolti ed elaborati e, infine, alla sistematizzazione di tutto il contenuto informativo allo scopo di realizzare un vero e proprio database di dati di traffico sulla mobilità urbana e utili per l'elaborazione di informazioni fruibili da parte degli utenti.

Una nuova generazione di metodologie per la stima e previsione di traffico in tempo reale si basa oggi su modelli di assegnazione dinamica del traffico, in grado di riprodurre in modo esplicito la formazione, propagazione, e dispersione delle code dei veicoli sulla rete stradale durante il giorno, compreso il fenomeno di spillback.

Il software OPTIMA utilizzato implementa questo approccio per reti di grandi dimensioni in ambienti on-line. Le correzioni riguardano la densità degli archi della rete e in particolare le code dei veicoli, che diversamente dai flussi persistono nel tempo, anche dopo che il veicolo che le ha generate esce fuori, e dunque, possono essere propagate sulla rete sia in avanti che all'indietro.

Per quanto attiene la simulazione, sulla base della domanda di mobilità (matrici O/D) e delle caratteristiche dell'offerta di trasporto (grafo ed eventuali eventi) ed integrando le misure di traffico provenienti dall'infrastruttura stradale, il modello utilizzato determina la distribuzione Real-Time dei flussi veicolari sulla rete di competenza, stimando i tempi di percorrenza e le condizioni di deflusso su tutti gli elementi del grafo e quindi anche su quelli non direttamente monitorati. Vengono, inoltre, effettuate delle stime di emissioni inquinanti associate ai flussi calcolati dal modello. Questi dati si rendono utili, ancorché indispensabili, per fornire un valido supporto alle decisioni ed un servizio di informazione all'utenza e di routing dinamico multimodale.

L'intero processo appena descritto è stato eseguito integrando un *modello di assegnazione dinamica* con la tecnica di previsione *rolling horizon*.

Nei paragrafi successivi sono affrontate e descritte le principali caratteristiche e proprietà del modello di simulazione utilizzato e del software sui quali è basata la metodologia adottata.

### 4.3.1 Procedura di assegnazione dinamica e tecnica di “Rolling horizon”

Il modello di assegnazione-simulazione del traffico utilizzato è costituito da un modello di assegnazione che riproduce il comportamento di scelta del percorso da parte degli utenti ed un modello di simulazione del traffico, che stima le prestazioni degli elementi della rete riproducendone le modalità di funzionamento.

La Figura 4.12 illustra l’architettura del sistema modellistico.

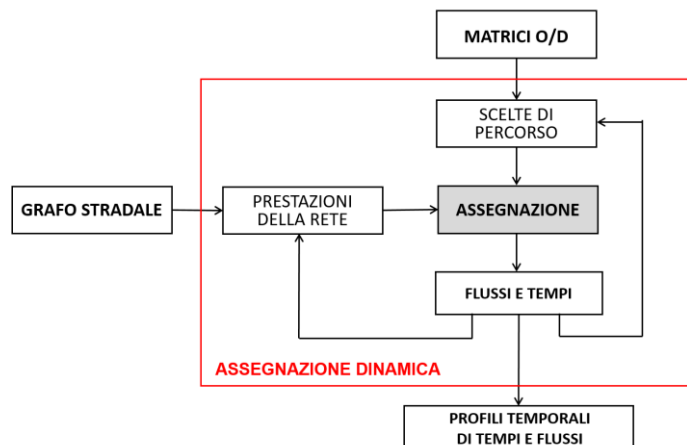


Figura 4.12 Struttura del modello di assegnazione dinamica

I dati di input sono la struttura della rete, rappresentata mediante un grafo con associate le funzioni di prestazione dei singoli elementi, e le matrici di domanda origine-destinazione per ciascun intervallo temporale.

Si perviene attraverso dei modelli di assegnazione alla stima dei flussi sugli archi della rete e quindi ai tempi di percorrenza. Applicando un approccio di tipo iterativo, utilizzando i flussi e i tempi di percorrenza trovati per effettuare una nuova assegnazione, si crea una dipendenza circolare che prevede ad ogni intervallo di aggiornamento un processo di caricamento dinamico.

In ogni caso, il risultato del modello di assegnazione dinamica fornisce i vettori dei flussi e delle velocità d’arco in ogni intervallo temporale, da cui è immediato determinare il profilo temporale dei tempi di percorrenza e dei flussi.

La previsione mediante l’applicazione di questo modello di simulazione fornisce un’informazione completa, perché estesa a tutti gli elementi della rete rappresentati dal modello, ed aggiornata con dati rilevati in tempo reale. Consente di prevedere la diffusione della congestione sulla rete stradale anche in presenza di incidenti o di altre anomalie e di calcolare dinamicamente i percorsi ottimi degli utenti al variare delle condizioni della rete. Al fronte di questi evidenti vantaggi rispetto ai metodi basati sull’analisi statistica dei dati, il



metodo di simulazione presenta anche due inconvenienti rilevanti: richiede la costruzione e calibrazione di un modello di rete ed ha lunghi tempi di elaborazione, che non si prestano ad una applicazione diretta in linea.

Per l'implementazione in linea è stata realizzata, allora, un'applicazione di aggiornamento periodico ad orizzonte mobile detta "rolling horizon" (Mahamassani, 2001). Con questo metodo si assegna una previsione su un periodo  $p$  relativamente lungo (dell'ordine di 30-60 minuti) e si attua la previsione per un periodo più breve  $h$ , necessario per calcolare una nuova previsione a partire dalle osservazioni raccolte nel periodo  $h$ .

La Figura 4.13 esemplifica il metodo. Questo è basato sui diversi periodi di aggiornamento del sistema che possono essere differenti a seconda dei diversi sotto-modelli considerati. Siano  $\delta$  l'intervallo di aggiornamento delle misure,  $h$  l'intervallo di tempo necessario per l'elaborazione di nuove previsioni e  $p$  l'orizzonte temporale di simulazione.

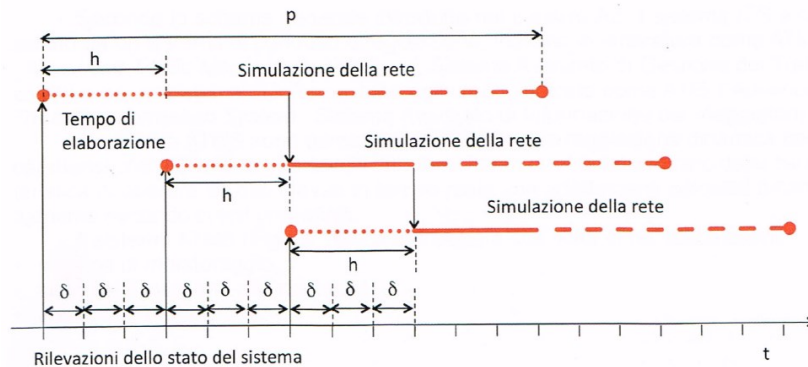


Figura 4.13 Approccio "Rolling horizon"

Acquisiti i dati di input del sistema di monitoraggio, viene avviata una simulazione del funzionamento della rete fino all'orizzonte temporale  $p$ ; terminato il calcolo all'istante  $h$ , viene avviata una nuova simulazione della rete per l'orizzonte  $[h, h+p]$  sulla base delle misure raccolte fino all'istante  $h - \delta$ . Terminato il secondo calcolo all'istante  $2h$  viene avviata una nuova simulazione per l'orizzonte  $[2h, 2h+p]$  sulla base delle nuove misure raccolte fino all'istante  $2h - \delta$ , e così via.

Il vantaggio di questo approccio sta nella disponibilità di una previsione del funzionamento della rete abbastanza lunga da coprire l'intera durata degli spostamenti, evitando così una previsione miope, ma avendo al tempo stesso la possibilità di aggiornare la previsione appena nuove misure sono disponibili.

### 4.3.2 La piattaforma di simulazione: OPTIMA

OPTIMA (Optimal Path Travel Information for Mobility Actions) è un software che combina i metodi di simulazione dei sistemi di trasporto stradali, basati su dati storici, con modelli di deflusso atti alla rappresentazione del traffico in tempo reale, alimentati dalle rilevazioni sul campo.

Nello specifico, OPTIMA è basato su un modello di assegnazione dinamica della domanda di trasporto alle reti stradali, che consente di stimare i tempi di percorrenza, i flussi di traffico e le code di veicoli nella loro variazione durante la giornata, a partire da un numero di osservazioni sullo stato della congestione estremamente ridotto rispetto alle altre metodologie esistenti, basate tipicamente sull'inferenza statistica delle misurazioni.

OPTIMA prevede la costruzione, calibrazione ed implementazione di un modello di assegnazione e caricamento dinamico del traffico finalizzato alla simulazione in tempo reale del traffico sulla rete stradale.

Per quanto riguarda l'offerta di trasporto, avvalendosi della teoria dei grafi, si è passati dalla struttura reale alla modellazione tramite un grafo composto da archi e nodi, individuando, a partire dal grafo completo, un sottoinsieme costituito da archi e nodi appartenenti al grafo di assegnazione sul quale vengono effettuate le simulazioni (Figura 4.14).

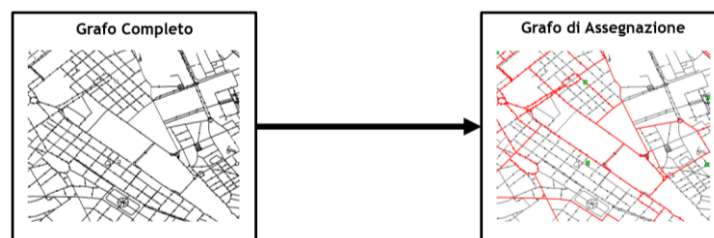


Figura 4.14 Grafo completo e grafo di assegnazione

La domanda di trasporto è stata invece modellizzata mediante dei profili di domanda differenziati a seconda della categoria veicolare, del giorno feriale o festivo e della fascia oraria. Questa particolarizzazione è stata eseguita per tenere conto della variabilità della domanda sia intragiornaliera che intergiornaliera e della complessità di spostamento associata alle diverse categorie veicolari. A partire dai segmenti di domanda e dalla loro distribuzione temporale, si è giunti alla formulazione del contenuto di matrici O/D utilizzate dal modello di simulazione per la procedura di assegnazione dinamica.

OPTIMA presenta un sistema modulare basato su un'architettura client-server che si fonda principalmente su quattro componenti software: i primi due offline e gli altri due in linea. La struttura metodologica, la cui schematizzazione funzionale è mostrata in Figura

4.15, è brevemente descritta nel seguito, identificando i componenti di modellazione (blocchi arrotondati), i dati di input e di output (blocchi rettangolari) e le loro relazioni (freccie).

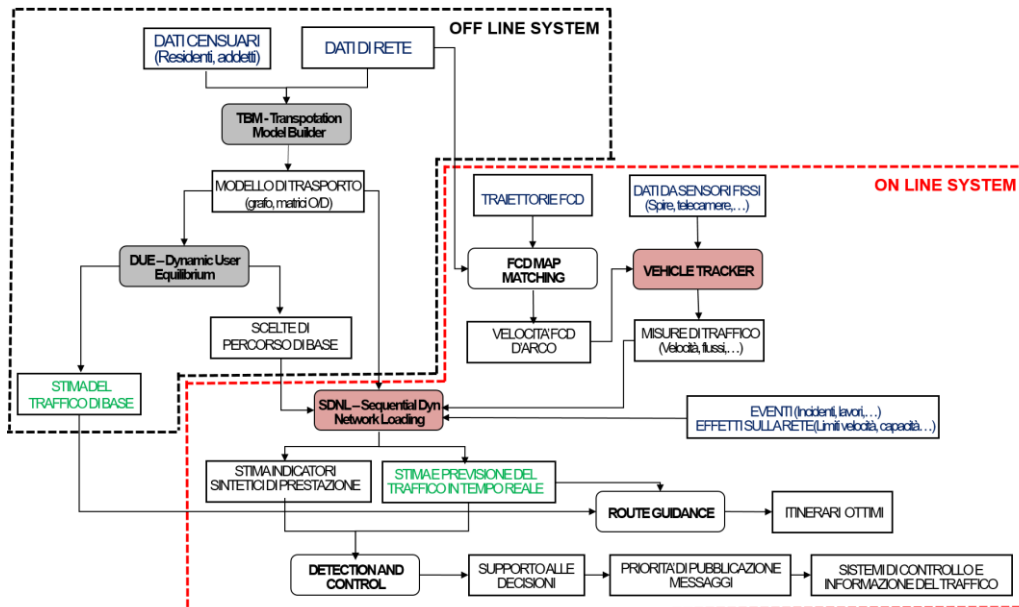


Figura 4.15 Schematizzazione funzionale di OPTIMA

Il *modello del sistema di trasporto* viene costruito e calibrato a partire da dati censuari, da stradari, da dati di mobilità e/o modelli di simulazione preesistenti. Il modello viene inoltre calibrato utilizzando delle misure medie di traffico (flussi e velocità di arco), al fine di riprodurre le condizioni di traffico che mediamente si manifestano sul sistema di trasporto in esame per diversi scenari di riferimento (“giorni tipo”). Questa operazione viene effettuata mediante una procedura semi-automatica memorizzata all’interno del *modulo Transportation Model Builder*.

Quindi, il modello del sistema di trasporto viene utilizzato in primo luogo off-line per calcolare, mediante una procedura di assegnazione attraverso il *modulo Dynamic User Equilibrium (DUE)*:

- una *stima del traffico di base*, ossia una stima a priori dell’evoluzione all’interno della giornata di flussi, code, tempi di percorrenza sugli archi della rete che mediamente riproducono le condizioni tipiche del traffico osservabili sulla rete di riferimento, eventualmente per diversi giorni tipici;
- le *scelte di percorso di base* (rappresentate come percentuali di svolta ai nodi variabili nel tempo), che rappresentano come la domanda di mobilità si distribuisce sulla rete di trasporto nei diversi giorni tipo.

Si noti come sia le stime del traffico di base che le scelte di percorso di base non siano costanti nel tempo, ma assumano valori differenti nei diversi istanti della giornata, così da

rappresentare le diverse condizioni di traffico di mobilità (ora di punta e di morbida, afflusso verso i luoghi di lavoro e relativi ritorni, ...).

Nella parte on-line, i dati di traffico in tempo reale, che rappresentano una misura dello stato della rete di trasporto, vengono da sensori sul campo:

- nella forma tradizionale di *dati veicolari da sensori fissi*, ossia misure di flussi, occupazione o velocità trasmesse dai sensori collocati sull'infrastruttura stradale;
- come *traiettorie veicolari*, provenienti da singoli veicoli sonda equipaggiati con sistemi Bluetooth.

Il modulo *Vehicle Tracker* associa in tempo reale le letture dei transiti rilevati dai sistemi Bluetooth installati sulle postazioni fisse consentendo di calcolare *velocità medie osservate* sugli archi del grafo stradale mediante una procedura in linea di *map-matching* automatico.

A completamento della fase di pre-elaborazione dei dati, tutte le misure di traffico osservate vengono validate, omogenizzate ed unite in *misure di traffico in tempo reale*, ossia valori armonizzati di flusso, velocità, densità osservati sugli archi del grafo stradale.

Analogamente ai dati di traffico, *gli eventi pianificati o imprevisti provenienti da fonti informative esterne* (es. lavori, incidenti, code, ...), vengono importati automaticamente nel sistema e ne viene calcolato l'effetto sulla rete di trasporto in termini di variazioni temporanee delle capacità e velocità di arco.

Quindi, il modulo *Sequential Dynamic Network Loading* (SDNL) ha il compito di combinare, mediante una procedura di assegnazione dinamica in *rolling horizon*, il *modello del sistema di trasporto* con le *misure di traffico* e gli *eventi*, generando ogni pochi minuti *una nuova stima e previsione del traffico in tempo reale*, ossia lo stato e l'evoluzione a breve delle condizioni di traffico effettive in termini di flussi, code, tempi di percorrenza su tutti gli archi della rete, anche se non monitorati, e di opportuni indicatori sintetici di prestazione *KPI (Key Performance Indicators)*, come ad esempio:

- il tempo di percorrenza totale sulla rete;
- la distanza totale percorsa;
- la lunghezza media delle code;
- il totale dei flussi di domanda attratti e generati;
- ecc.

Queste simulazioni, adesso calibrate, costituiscono le previsioni dei tempi di percorrenza che possono essere utilizzate dal *modulo Route Guidance* per il servizio di routing in grado di suggerire gli itinerari migliori.

Infine, il *modulo Detect and Control* valuta le previsioni real-time e i valori dei KPI al fine di individuare automaticamente le situazioni in cui i livelli di servizio presentano valori al di sotto di determinate soglie critiche, generando in automatico eventi di traffico da inviare agli utenti, tramite le interfacce dati. In questo contesto, il *modulo Smart Display*, supporta l'operatore nel definire la priorità di pubblicazione dei messaggi da comunicare o trasmettere

agli utenti su un dato elemento della rete stradale, sia predeterminato che stabilito dinamicamente.

Rispetto agli approcci ed alle metodologie esistenti per la stima e la previsione dei tempi di percorrenza, OPTIMA presenta, dunque, le seguenti caratteristiche innovative e differenze fondamentali:

- fornisce tempi di viaggio che non sono costanti nel tempo, ma variabili durante il giorno a seconda del traffico stimato e/o della congestione osservata; questi tempi sono in via definitiva più precisi ed affidabili rispetto a quelli di fatto forniti da altre metodologie;
- è in grado di eseguire in tempo reale e a seconda dell'orario di partenza il calcolo del percorso ottimo, sulla base dei tempi di viaggio e delle caratteristiche della rete stradale variabili nel tempo (ad esempio zone a traffico limitato);
- la stima e la previsione dei tempi di viaggio, sia l'off-line che in tempo reale, non richiedono un'estesa raccolta di dati di traffico; al contrario, hanno bisogno di una quantità limitata di dati osservati; il sistema è in grado di estendere sia nel tempo che nello spazio queste misure di campo, integrandole con dati storici mobilità;
- le informazioni sul traffico sono raccolte, trasmesse ed elaborate automaticamente, senza la necessità di un operatore; ciò comporta una drastica riduzione dei tempi necessari per rendere disponibili queste informazioni e fornire un supporto alle decisioni;
- è un modello scalabile e replicabile, dal momento che si basa su standard commerciali e su dati pubblicamente disponibili per quanto riguarda la mobilità e le attività socioeconomiche; inoltre, non si basa su fonti di informazione esterne provenienti da parte di comuni, polizia o operatori di rete (anche se è possibile utilizzare questi dati, se disponibili), dal momento che le osservazioni possono giungere dagli stessi veicoli che utilizzano il sistema e si comportano da sensori mobili automatici.

A seguire sono brevemente descritte le componenti maggiormente innovative dal punto di vista metodologico.

#### **4.3.2.1 TMB – Transportation Model Builder**

Questo modello integra in un'interfaccia grafica GIS una metodologia che permette di determinare, attraverso una catena di modelli e algoritmi, il grafo della rete di trasporto, la zonizzazione territoriale e le matrici di domanda origine-destinazione, a partire da reti commerciali (ad esempio Navteq, TeleAtlas) e dati socio-economici standard (ad esempio ISTAT, ISFORT, per l'Italia) in modo totalmente automatico.

TMB permette, dunque, di realizzare per le grandi aree urbane una simulazione del traffico veramente predittiva, solamente con qualche giorno di calibrazione, affidandosi per lo più a dati pubblicamente disponibili. Questo strumento consente, inoltre, la messa a punto a basso costo di banche dati per sviluppare algoritmi di assegnazione del traffico, che risultano essere utili per gli studi di pianificazione finalizzati alla gestione della mobilità e per i sistemi di monitoraggio volti ai servizi di navigazione e di routing.

#### **4.3.2.2 DUE –Dynamic User Equilibrium**

Questo software risolve il processo di assegnazione dinamica per grandi reti stradali con adeguati tempi di calcolo, simulando la formazione, la dispersione e la retro-propagazione (spillback) delle code durante il giorno, sia per contesti metropolitani che in aree extraurbane. Data una domanda di spostamento variabile nel tempo, da una determinata origine ad una destinazione, DUE fornisce l'andamento dei flussi di traffico nel corso della giornata, le code dei veicoli, i tempi di viaggio e le emissioni inquinanti per ogni collegamento stradale in condizioni di equilibrio, insieme ai costi generalizzati sostenuti da ciascun utente e alla corrispondente scelta di viaggio, in particolare la loro traiettoria in rete.

DUE permette di analizzare contesti multiutente e multimodali con una domanda elastica, includendo anche la scelta dell'orario di partenza. È, inoltre, disponibile un modulo per la correzione delle matrici O/D a partire da conteggi di traffico, in modo da tenere in considerazione la loro evoluzione giornaliera.

Pertanto, DUE è il primo software in grado di gestire le reti metropolitane in maniera dettagliata, riuscendo a simulare in tempo reale un intero giorno. Questo risultato è possibile perché DUE gestisce le relazioni tra interi profili temporali, permettendo così di prendere in considerazione lunghi intervalli di tempo (minuti), al contrario dei micro-simulatori e meso-simulatori che richiedono intervalli di tempo molto più brevi (secondi).

#### **4.3.2.3 Vehicle Tracker**

Vehicle Tracker è un'applicazione client-server per l'utilizzo dei dati FCD (Floating Car Data) all'interno della OPTIMA. Il metodo consente di tracciare sul grafo stradale la traiettoria dei veicoli con a bordo un dispositivo mobile (palmare o telefono cellulare) dotato di un sistema per il posizionamento satellitare (GPS) e di una connessione ad internet (GPRS o UMTS). L'applicazione raccoglie i pacchetti di punti spazio-temporali (coordinate geografiche) inviati, con intervalli regolari e mediante connessione wireless, dal dispositivo mobile al server, che li proietta sul grafo stradale, filtrando le rilevazioni che implicano

traiettorie inverosimili mediante un algoritmo di graph matching, così da ricostruire il percorso effettivamente seguito dal veicolo e poter determinare le sue velocità.

Uno dei vantaggi di questo metodo è quello di riuscire a processare migliaia di traiettorie in pochi secondi.

#### **4.3.2.4 SDNL – Sequential Dynamic Network Loading**

È un metodo per la stima in tempo reale e la previsione a breve termine delle condizioni di deflusso veicolare su archi stradali, a partire da dati di traffico (velocità e flussi) rilevati con continuità sulla rete mediante veicoli sonda (FCD) e sensori fissi installati in campo (dispositivi radar).

Il modello matematico sottostante si basa su una rappresentazione esplicita della mobilità giornaliera, quale caricamento dinamico della domanda di trasporto (matrici o-d) sull'offerta di trasporto (grafo), che simula, da un lato, i flussi di spostamenti per date scelte di percorso, dall'altro il funzionamento della rete e la propagazione della congestione. SDNL mira, cioè, a riprodurre il fenomeno del traffico secondo un approccio deduttivo, piuttosto che induttivo; al contrario, i sistemi esperti, che spesso vengono utilizzati nelle applicazioni per l'infomobilità, cercano di interpolare le misure storiche di flussi e velocità, estrapolando le previsioni direttamente dai dati senza considerare esplicitamente la fisica del sistema.

Il vantaggio dell'approccio utilizzato da SDNL, che comunque può essere integrato con il secondo, è quello di estendere e proiettare nel tempo e nello spazio le rilevazioni puntuali di flusso e velocità, con lo scopo di ottenere un quadro complessivo del traffico sull'intera rete stradale e una previsione della sua evoluzione a breve termine, anche in occasione di situazioni non sperimentate fino a quel momento, quali incidenti e lavori stradali. A tal fine SDLN necessita di maggiori informazioni sulle caratteristiche della rete stradale e sulla domanda di trasporto; in particolare, richiede di determinare preventivamente per i diversi giorni tipo e le diverse ore della giornata, i tassi di diversione prevalenti ai nodi (splitting rates).

L'applicazione SDNL funziona in rolling horizon, ossia le attuali misurazioni di flusso e velocità vengono trasformate in densità veicolari sugli archi e capacità in uscita, che vanno così a correggere periodicamente il numero di veicoli e le condizioni di deflusso previsti dal modello stesso; quindi il processo che simula la propagazione dei flussi e delle code viene riavviato. A differenza dei flussi, le code hanno una certa persistenza e quindi l'effetto di una correzione va ben oltre il tempo di viaggio per raggiungere la destinazione impiegato dai veicoli che l'hanno generata; sulla previsione corrente hanno così influenza tutte le misure pervenute in precedenza. Inoltre, le correzioni si propagano secondo i tassi di diversione ai

nodi, e non seguendo i veicoli che le hanno generate, diffondendosi così sulla rete e andando ad aggiornare i tempi di percorrenza relativi ad archi non monitorati.

### **4.3.3 Calibrazione sperimentale del modello**

La calibrazione è un processo di aggiustamento di alcuni parametri propri del modello per migliorare la capacità simulativa e l'abilità dello stesso nel riprodurre le prestazioni di traffico reale e le caratteristiche degli utenti. Nella maggior parte dei casi, la calibrazione si effettua utilizzando metodi di stima statistica che hanno come input dati derivanti da opportune rilevazioni.

In termini generali si può dire che l'obiettivo dell'operazione di stima è quello di calcolare i valori dei parametri in modo da rendere minima la differenza tra i valori modellati e quelli sperimentali delle variabili di interesse. Una volta che il modello risulta aderente al comportamento reale possono essere sviluppate tutte le varianti, sia dal lato della domanda che dell'offerta di trasporto, a seconda dello scenario da analizzare.

La metodologia di calibrazione sperimentale del modello utilizzato si basa in buona sostanza sull'utilizzo di dati storici pregressi precedentemente rilevati in campo in modo da "forzare" il modello a riprodurre gli stessi valori.

Nello specifico, per la calibrazione del sistema ITS, sono stati utilizzati i dati riguardanti i flussi di traffico rilevati mediante monitoraggio automatico con sensori di rilievo di tipo radar.

È stato individuato un periodo di durata abbastanza esteso per la raccolta dei dati rilevati in campo. Tutti i rilievi eseguiti nell'arco delle ore di monitoraggio sono stati presi in considerazione distinguendo il traffico nelle due classi di veicoli leggeri e pesanti, in modo tale da ottenere le due componenti matriciali che alimentano il modello di simulazione.

I dati ottenuti sono stati successivamente mediati per intervalli orari ed utilizzati per le procedure di assegnazione. In particolare, per l'aggiornamento della matrice O/D è stata utilizzata una funzione del programma di macro-simulazione, in grado di aggiornare la matrice sulla base del set dei dati di traffico rilevati.

## **4.4 Analisi statistica dei dati di traffico**

La metodologia utilizzata per valutare l'affidabilità dei dati di traffico del modello è quella dei risconti sul campo. Nello specifico, sono stati analizzati sia i dati provenienti dai



dispositivi di rilievo installati sull'infrastruttura stradale, sia le stime di traffico elaborate dal modello.

Le fasi fondamentali di questa procedura di analisi sono le seguenti:

- individuazione dei siti di rilievo;
- esecuzione dei rilievi sul campo;
- analisi e confronto dei dati;
- controllo degli errori;
- produzione dei risultati.

Le sezioni di rilievo sono state scelte rispettando due criteri: per l'analisi dei dati rilevati dai sensori sono state scelte le sezioni in corrispondenza dei siti di installazione degli stessi; mentre, per l'analisi delle stime effettuate dal modello, la scelta è stata compiuta in funzione di più aspetti riguardanti le caratteristiche della sezione stradale (numero di corsie per senso di marcia, presenza di spartitraffico centrale, ecc.), la tipologia di flusso (entità e tipo di scorrimento), la presenza o meno di un dispositivo di rilievo in corrispondenza della sezione prescelta, ecc., al fine di esaminare un più ampio spettro di configurazioni ed effettuare un'analisi statistica completa e più significativa possibile.

I riscontri sul campo sono stati effettuati in corrispondenza di questi nodi della rete opportunamente scelti, con stazionamenti di durata pari ad un'ora e per differenti giorni della settimana. Il rilevatore è stato predisposto da una scheda per ogni sezione in annotare il numero di passaggi degli automezzi e il verificarsi di eventuali situazioni anomale. I veicoli sono stati conteggiati secondo una suddivisione in classi semplificata rispetto a quella operata dal sensore di rilievo.

Una volta acquisiti i dati, questi sono stati aggregati in maniera opportuna e resi disponibili tramite un foglio di calcolo Excel per le successive elaborazioni. Dunque, sono stati eseguiti dei confronti ed una analisi di affidabilità dei dati mediante indici statistici.

Infine, la produzione dei risultati è stata realizzata attraverso elaborazioni numeriche riassunte in forma tabellare e, per un'immediata interpretazione, mediante rappresentazione grafica.

#### **4.4.1 Analisi dei dati rilevati da monitoraggio automatico**

Nell'esecuzione dei rilievi, i giorni tipo analizzati fanno riferimento, in generale, alla condizione feriale e a quella festiva. Per quanto attiene la durata del rilievo, se questo non può essere eseguito in modo continuo, è necessario stabilire delle opportune fasce orarie al fine di esaminare le differenti condizioni di deflusso veicolare.

Nel caso in esame, trattandosi di un confronto tra i dati di un rilievo automatico e quelli provenienti da un riscontro in campo eseguito da un operatore manuale, sono stati scelti due

differenti giorni della settimana e tre fasce orarie in modo da attenzionare le diverse caratteristiche che presenta il traffico in un'area urbana durante la settimana, soprattutto durante le ore di punta quando si genera il fenomeno della congestione.

La scheda predisposta per l'esecuzione del rilievo contiene le informazioni riguardanti la denominazione della sezione presa in considerazione, con la specificazione del verso di percorrenza nel caso di sezioni con due corsie per senso di marcia, il giorno di rilievo e la fascia oraria analizzata. Per quanto attiene ai dati in essa registrati, questi sono suddivisi per classe veicolare e secondo l'intervallo di aggregazione prescelto.

Le analisi eseguite sui dati sono le seguenti:

- confronto numerico;
- misura dello scostamento percentuale medio;
- analisi di variabilità dei dati;
- analisi di correlazione.
- analisi di regressione.

Per effettuare queste analisi, è stato necessario effettuare una sistematizzazione dei dati ottenuti dal rilievo: nello specifico si è proceduto ad aggregare le diverse categorie dei veicoli in due classi veicolari rispettivamente indicanti i mezzi leggeri e quelli pesanti, ed inoltre si è operata una aggregazione temporale, raggruppando i rilievi ad intervalli di durata pari a 5 minuti.

Il *confronto numerico* ha previsto la comparazione in parallelo dei dati rilevati dal sensore e di quelli rilevati in campo, in particolare dei flussi di traffico riferiti ad intervalli temporali di 5 minuti, per le tre fasce orarie considerate e suddividendo l'analisi per la classe dei veicoli leggeri, la classe dei veicoli pesanti e quella dei veicoli totali. Questo stesso livello di dettaglio è stato mantenuto anche per le analisi successive descritte nel seguito.

La *misura dello scostamento percentuale medio* tra i dati è stata eseguita calcolando la differenza  $d$  tra la percentuale di flusso orario rilevato dal sensore durante l'intervallo di tempo considerato e la percentuale di flusso orario rilevato in campo dall'operatore. Per ogni intervallo  $\Delta t$ , si calcola la percentuale di flusso registrato durante tale intervallo (5 minuti) rispetto al flusso registrato durante l'intero periodo della misurazione (1 ora), sia per i dati rilevati in campo che per quelli rilevati dal sensore, ottenendo così:

$$F\%_{campo} = \frac{(f_{(i-j)h,k,g})_{campo}}{f_{h,k,g}} * 100 \quad \text{Eq. (4.4)}$$

$$F\%_{sensore} = \frac{(f_{(i-j)h,k,g})_{sensore}}{f_{h,k,g}} * 100 \quad \text{Eq. (4.5)}$$

dove:

- $i$  e  $j$  rappresentano rispettivamente l'istante iniziale e quello finale dell'intervallo di analisi;
- $h$  la fascia oraria di riferimento;
- $k$  la classe veicolare considerata;
- $g$  il giorno di esecuzione del rilievo.

Ottenuti i valori di  $F\%_{campo}$  ed  $F\%_{sensore}$  è stato possibile calcolare la loro differenza  $d$ , che permette di rappresentare graficamente il diagramma delle differenze degli scarti:

$$d = F\%_{campo} - F\%_{sensore} \quad \text{Eq. (4.6)}$$

Esprimendo quest'ultima in valore assoluto ed estraendo dalla serie delle  $d_{ass}$  i valori minimo  $d_{min}$  e massimo  $d_{max}$ , essi rappresentano gli estremi del range entro il quale varia lo scostamento tra i dati rilevati dall'osservatore e quelli rilevati dal sensore. Pertanto, tanto più è stretto questo intervallo di variazione, migliore sarà considerata l'affidabilità di rilievo dei dispositivi installati sul campo.

L'analisi di variabilità si è basata, invece, sul calcolo della deviazione standard dei dati e dei corrispondenti coefficienti di variazione, che rappresentano un indice di precisione della misura:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i-j=1}^n ((f_{(i-j)h,k,g}) - \mu_f)^2}{n-1}} \quad \text{Eq. (4.7)}$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{|\mu_f|} \quad \text{Eq. (4.8)}$$

con  $n$  numero di intervalli considerati all'interno della fascia oraria di riferimento e  $\mu_f$  la media dei valori dei flussi analizzati.

Per eseguire l'analisi di correlazione si è fatto riferimento all'indice statistico corrispondente e cioè al coefficiente di correlazione. Indicando con la serie  $x_i$  i dati rilevati dal sensore e con la serie  $y_i$  i dati rilevati in campo dall'operatore, si calcola il tale coefficiente di correlazione  $\rho_{xy}$  dato dal rapporto tra la covarianza  $\sigma_{xy}$  e il prodotto delle rispettive deviazioni standard  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2}{n-1}} \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)^2}{n-1}} \quad \text{Eq. (4.9) e (4.10)}$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad \text{Eq. (4.11)}$$

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{Eq. (4.12)}$$

con  $\mu_x$  e  $\mu_y$  rappresentanti la media dei valori delle due serie considerate.

In funzione del valore assunto da questo coefficiente è possibile stabilire il grado di correlazione tra le due variabili:

- se ( $\rho_{xy} < 0$ ) le variabili si dicono inversamente correlate o correlate negativamente;
- se ( $\rho_{xy} = 0$ ) le variabili si dicono incorrelate;
- se ( $\rho_{xy} > 0$ ) le variabili si dicono direttamente correlate o correlate positivamente.

In particolare:

- se ( $0 < \rho_{xy} < 0,3$ ) si ha una correlazione diretta debole;
- se ( $0,3 < \rho_{xy} < 0,7$ ) si ha una correlazione diretta moderata;
- se ( $\rho_{xy} < 0,7$ ) si ha una correlazione diretta forte.

Infine, con riferimento all'analisi di regressione, riportando su un grafico i punti aventi le coordinate  $(x_i, y_i)$ , è stata effettuata una regressione lineare tramite il metodo dei minimi quadrati. Imponendo che la retta interpolante passi per l'origine, si calcola il coefficiente di determinazione  $R^2$  che rappresenta una misura della bontà di adattamento della regressione stessa. La precisione della retta calcolata dipende dal grado di dispersione dei dati. Più i dati sono lineari, più il modello di regressione risulterà accurato.

## 4.4.2 Analisi dei dati stimati dal modello

L'analisi dei dati stimati dal modello è stata eseguita, in linea generale, similmente a quanto svolto nella precedente per i dati rilevati dai sensori. Tuttavia, si evidenziano le seguenti differenze:

- la durata degli intervalli considerati è superiore, ed in particolare posta pari al tempo che intercorre tra la fine di una simulazione e l'inizio della successiva (un quarto d'ora);
- la classificazione veicolare distinta in mezzi leggeri e pesanti non è operata, bensì viene presa in considerazione un'unica classe di veicoli equivalenti;
- l'analisi di regressione è ritenuta, in questo caso, poco significativa dato l'esiguo numero di dati da interpolare all'interno di ciascuna fascia oraria, pertanto non è stata eseguita.

Da queste considerazioni, si evince che le formulazioni presenti nel paragrafo precedente, in forma addirittura più semplificata, si rendono valide anche per l'analisi dei dati stimati, sostituendo ai valori rilevati dal sensore quelli ottenuti dal modello di simulazione.

## 4.5 Misura dell'affidabilità del sistema di trasporto

Lo studio dell'affidabilità delle reti stradali è focalizzato principalmente su tre aspetti:

- l'*affidabilità della connettività* che riguarda la probabilità che i nodi di una rete rimangano sempre collegati;
- l'*affidabilità del tempo di percorrenza* che rappresenta la probabilità che un viaggio tra una determinata coppia origine-destinazione (O/D) possa essere realizzato con successo all'interno di un intervallo di tempo specificato;
- l'*affidabilità della capacità*, definita come la probabilità che la rete possa ospitare una data quantità di domanda di traffico con un certo livello di servizio richiesto.

Risulta di fondamentale importanza sapere a quale definizione di affidabilità fare riferimento, poiché questo aspetto ha importanti implicazioni per le scelte che saranno fatte nell'ambito della pianificazione e gestione del sistema di trasporto.

Pertanto, la metodologia utilizzata per valutare l'affidabilità della rete di trasporto oggetto di studio fa riferimento alla seconda definizione, e cioè all'affidabilità dei tempi di percorrenza ed in particolare all'analisi della loro "stabilità". Infatti, con la crescente consapevolezza che gli utenti della rete si preoccupano di più della variabilità dei tempi di percorrenza rispetto ad eventuali ritardi, studi recenti suggeriscono una maggiore enfasi nei confronti dell'aumento dell'affidabilità rispetto alla riduzione dei tempi medi di percorrenza (Noland and Polak, 2002; Brownstone and Small, 2005; Lyman and Bertini, 2008).

Nei due paragrafi successivi è descritta la metodologia adottata per la valutazione dell'affidabilità dei tempi di percorrenza (*TTR – Travel Time Reliability*) della rete, con particolare riferimento ai livelli di dettaglio analizzati e alle variabili di rete ed indici statistici utilizzati.

### 4.5.1 Analisi statistica

Il tempo di percorrenza è inteso come il tempo necessario affinché un viaggiatore compia uno spostamento tra due distinti punti della rete di trasporto. La sua durata è legata a diversi fattori e, pertanto, può accadere di registrare tempi di percorrenza differenti anche per uno stesso percorso o per percorsi analoghi.

In altre parole, quindi, è possibile definire il tempo di percorrenza come una distribuzione statistica, in cui la variazione delle variabili associate serve a mostrare la sua uniformità e regolarità o, viceversa, la sua variabilità. In questo modo, l'affidabilità del tempo di percorrenza può essere definita come la misura della dispersione (o spread) della distribuzione dei tempi di viaggio. Ciò sottolinea la necessità di pensare al tempo di percorrenza in termini di frequenza, e non solo di intensità.

Con questo scopo, lo studio portato avanti ha previsto lo sviluppo di una metodologia per la stima della Travel Time Reliability (TTR) di una rete di trasporto estesa a differenti livelli di aggregazione, utilizzando i dati di traffico storici provenienti dal rilievo dei sensori radar e i dati real-time ottenuti dal modello di simulazione, mediante l'analisi e il confronto di differenti misure della TTR.

Le variabili statistiche utilizzate per quantificare la TTR della rete sono le seguenti:

- la deviazione standard ( $\sigma$ );
- il travel time window ( $TTW$ );
- il buffer index ( $B$ );
- il buffer time ( $BT$ );
- il planning time index ( $PTI$ ).

La *Deviazione Standard* si utilizza per descrivere la dispersione dei tempi di percorrenza intorno al loro valore medio. Si tratta di una misura espressa in secondi, minuti o ore (a seconda del livello di dettaglio considerato) ed è stata calcolata con la seguente espressione:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N (TT_{d,i-j} - M)^2} \quad \text{Eq. (4.13)}$$

dove:

- $\sigma$  rappresenta la deviazione standard dei tempi di percorrenza;
- $N$  è il numero di spostamenti osservati in un determinato intervallo della giornata (nel caso di un'analisi intragiornaliera) o durante la settimana (analisi intergiornaliera);
- $TT_{d,i-j}$  è il tempo di percorrenza effettivamente impiegato a percorrere un arco stradale, nel giorno  $d$  e durante l'intervallo temporale  $i-j$ ;
- $M$  rappresenta la media dei tempi di percorrenza osservati.

Tramite il calcolo di questo indice statistico si è in grado di capire quanto il tempo effettivamente impiegato a percorrere un arco stradale si allontani dal tempo medio di percorrenza.

Per quantificare questo scostamento, è stato calcolato il *Travel Time Window*, aggiungendo e sottraendo il valore della deviazione standard alla media dei tempi di percorrenza, come indicato nell'equazione:

$$TTW = \sigma \pm M \quad \text{Eq. (4.14)}$$

Un'altra misura statistica analizzata è rappresentata dal calcolo del Buffer Index, il quale risulta essere normalizzato per il tempo di percorrenza più ricorrente e si calcola con la seguente espressione:

$$B = \frac{(TT_{95} - M)}{M} \quad \text{Eq. (4.15)}$$

con:

- $TT_{95}$  = tempo di percorrenza effettivamente impiegato a percorrere un arco stradale nel 95% dei casi.

Dunque, il valore assunto dal buffer index indica la differenza tra il tempo impiegato per muoversi su un determinato percorso nel 95% dei casi e il suo tempo medio di percorrenza. In particolare, questo indice è stato associato alla percentuale di tempo extra necessario che un guidatore deve tenere in considerazione per essere sicuro di avere una "elevata" probabilità di arrivare in orario, e risulta essere strettamente correlata alla variabilità dei tempi di viaggio.

A partire dal valore del buffer index, è stato calcolato il *Buffer Time* che rappresenta, invece, il tempo extra che i viaggiatori devono aggiungere al tempo medio di percorrenza quando pianificano uno spostamento, al fine di arrivare secondo l'orario programmato.

Infine, l'ultimo indice statistico utilizzato è il Planning Time Index (PTI), calcolato mediante la seguente relazione:

$$PTI = M \pm M * B \quad \text{Eq. (4.16)}$$

Con tale indice, si individua il valore del tempo totale impiegato da un viaggiatore per compiere uno spostamento su un determinato percorso, essendo sicuro di ultimarlo ed arrivare a destinazione entro il tempo previsto.

## 4.5.2 Variabili di rete e livelli di analisi

Le variabili di rete utilizzate per il calcolo degli indici statistici descritti nel paragrafo precedente e per la valutazione della TTR sono:

- i flussi;
- i tempi di percorrenza.

Queste grandezze sono relative a ciascun arco della rete di trasporto analizzata e sono stimate attraverso il modello di simulazione basato sull'assegnazione dinamica e l'aggiornamento ad orizzonti mobili con le misure raccolte sul campo.

Prima di tutto, dunque, è stato individuato l'insieme  $N$  degli archi analizzati della rete, ciascuno dei quali indicizzato con il generico pedice  $k$ , con  $k = 1, \dots, N$ . Successivamente sono stati calcolati i relativi flussi entranti ed uscenti e i tempi di percorrenza, assumendo che fossero rappresentativi di ciascun arco, per un determinato intervallo di tempo  $i-j$  e per uno specifico giorno  $d$ .

Il modello di simulazione aggrega i dati di traffico stimati in intervalli di 15 minuti, in modo da ottenere dei valori stabili. Come risultato, quindi, si ha che ciascun giorno analizzato risulta diviso in 96 intervalli temporali indicati con gli indici  $i$  e  $j$ , ed in particolare con  $i$  l'istante iniziale dell'intervallo considerato e  $j$  l'istante finale.

Pertanto, con  $t_{k,d,i-j}$  è stato definito il tempo medio di percorrenza relativo al generico arco  $k$ , nel giorno  $d$ , durante l'intervallo temporale  $i-j$ . A questo punto, a partire da tali valori sono stati calcolati i tempi medi totali di percorrenza  $T_{d,i-j}$  dell'intera rete, utilizzando la relazione:

$$T_{d,i-j} = \sum_{k=1}^N t_{k,d,i-j} \quad \text{Eq. (4.17)}$$

dove:

- $N$  rappresenta il numero totali di archi della rete stradale analizzata.

Una procedura analoga è stata seguita per il calcolo dei flussi di traffico. Nello specifico, il flusso totale entrante relativo all'insieme  $N$  di archi della rete analizzati è stato calcolato con la stessa metodologia utilizzata per la determinazione di  $T_{d,i-j}$ , utilizzando la formulazione:

$$F_{e,d,i-j} = \sum_{k=1}^N f_{e,k,d,i-j} \quad \text{Eq. (4.18)}$$

con:



- $f_{e\ k,d,i-j}$  = flusso in entrata di un singolo arco  $k$  della rete, nel giorno  $d$  e durante l'intervallo temporale  $i-j$ , espresso in veicoli equivalenti;
- $F_{e\ d,i-j}$  = flusso totale entrante nella rete di trasporto analizzata, nel giorno  $d$  e durante l'intervallo temporale  $i-j$ , espresso anch'esso in veicoli equivalenti.

Analogamente, per il calcolo dei flussi uscenti si è fatto riferimento alla seguente espressione:

$$F_{u\ d,i-j} = \sum_{k=1}^N f_{u\ k,d,i-j} \quad \text{Eq. (4.19)}$$

con:

- $f_{u\ k,d,i-j}$  = flusso in uscita di un singolo arco  $k$  della rete, nel giorno  $d$  e durante l'intervallo temporale  $i-j$ , espresso in veicoli equivalenti;
- $F_{u\ d,i-j}$  = flusso totale uscente della rete di trasporto analizzata, nel giorno  $d$  e durante l'intervallo temporale  $i-j$ , espresso anch'esso in veicoli equivalenti.

Dal momento che il comportamento e le caratteristiche della mobilità variano in funzione di diverse situazioni temporali (Park et al., 1998; Chung, 2012), per esaminare i vari schemi e le configurazioni assunte dal traffico, risulta necessario operare un'analisi di tipo disaggregato. Quindi, per quanto riguarda i giorni di analisi esaminati, è stata operata una separazione tra i giorni feriali (dal lunedì al venerdì) e il fine settimana (sabato e domenica), distinguendoli in giorni lavorativi (working day) e non lavorativi (non-working day).

Inoltre, sono state svolte due analisi temporali: una intra-giornaliera, utile nel caso di spostamenti sistematici per valutare le variazioni del tempo di percorrenza quando la partenza è sempre fissata allo stesso orario della giornata, e un'analisi di tipo intergiornaliera, per valutare i diversi comportamenti degli utenti a seconda delle condizioni di traffico in cui si trovano.

Questa metodologia è stata applicata per differenti livelli di aggregazione della rete, svolgendo un'analisi di rete a livello globale e, successivamente sono stati esaminati i due livelli di percorso e di arco. A differenza di molti studi precedenti, focalizzati sull'analisi dell'affidabilità su percorsi o ad un livello di arco, la ricerca svolta ha realizzato un ampio range di analisi a livello di globale di rete, successivamente di percorso e infine a livello di arco.

Nel capitolo del caso studio relativo alla determinazione dell'affidabilità dei tempi di viaggio sono riportati i principali risultati ottenuti dall'applicazione di questa metodologia alla rete di Catania.

# CAPITOLO 5

## CASO STUDIO

### 5.1 Quadro territoriale e scelta del caso studio

La mobilità delle persone e delle merci rappresenta una questione cruciale per la nostra società. Così, la capacità di prevedere le condizioni del traffico sulla rete e di prendere decisioni in merito ai percorsi migliori, sia per gli utenti che per i veicoli, consente una più efficiente pianificazione delle attività da parte di individui ed aziende, ottenendo in generale un notevole risparmio per la società nel suo complesso.

Per affrontare queste necessità, negli ultimi anni vi è stato un notevole sviluppo tecnologico dei cosiddetti Sistemi di Trasporto Intelligenti (ITS). La diffusione di sistemi automatici per il monitoraggio di reti stradali sia urbane che extraurbane, ha reso ora disponibile una grande quantità di dati (flussi, densità e velocità dei veicoli su determinate sezioni), sia storici che in tempo reale, in grado di descrivere lo stato di molti collegamenti stradali e la loro evoluzione nel tempo.

In parallelo, la diffusione delle attuali tecnologie per le comunicazioni mobili e di posizionamento satellitare si rendono utili ai singoli viaggiatori per fornire informazioni in tempo reale a supporto di decisioni dinamiche e strategie adattative.

Consideriamo, in particolare, la possibilità di suggerire ai conducenti percorsi ottimali in relazione alle attuali e previste condizioni del traffico su tutta la rete e, nello specifico, in base alle stime dei tempi di percorrenza.

La rete oggetto di studio coincide con il territorio dell'area urbana della città di Catania, di competenza comunale e in parte anche provinciale, nonché porzioni di rete di competenza statale gestite tramite l'ANAS.

Catania è una città di circa 300.000 abitanti e si trova nella parte orientale della Sicilia; ha una superficie di circa 183 km<sup>2</sup> e una densità abitativa di 1.754,54 abitanti / km<sup>2</sup> (Istat, 2015). Fa parte di una più grande area metropolitana (750.000 abitanti), che comprende il comune principale e 26 centri urbani circostanti, alcuni dei quali costituiscono un intero tessuto urbano con Catania. La città principale contiene la maggior parte delle attività lavorative, insieme ad aree residenziali.

Quanto appena detto, fa sì che la domanda di trasporto sia largamente riferibile al mezzo privato. La circolazione delle autovetture private a Catania ha caratteristiche corrispondenti, qualitativamente e quantitativamente, alle abitudini e alle scelte generalizzate dei cittadini, e quindi alla natura stessa della domanda, in relazione comunque alla morfologia urbanistica e insediativa della città e alle modalità di trasporto fin oggi offerte all'utente.

Infatti, nel tempo la popolazione cittadina si è distribuita nell'intera area metropolitana andando a risiedere nei comuni che circondano il capoluogo etneo e creando un unico sistema urbano che va ben oltre i confini comunali. Questa dinamica ha fatto sì che si siano modificati la forma e la distribuzione temporale degli spostamenti che oggi esercitano una forte pressione sulla città. Il verso dominante della domanda e delle correnti veicolari è, infatti, radiale (al più lineare lungo la costa) e la massa d'automobili, quindi, provenienti dalle più o meno larghe periferie e dai comuni limitrofi si ingolfa quotidianamente nella più ristretta area centrale. In questa si abbassano, così, le velocità di deflusso delle correnti veicolari, anche a causa della sosta disordinata e illegale, e si innalzano i livelli di inquinamento atmosferico, acustico e visivo.

Questa accresciuta propensione alla mobilità ha favorito un fenomeno di per sé "fisiologico", ossia l'incremento dei tassi di motorizzazione individuale, che hanno aumentato notevolmente il numero di vetture in circolazione in una struttura urbana già prossima alla saturazione, comportando un incremento considerevole del grado di congestione e un altrettanto preoccupante incremento dei danni ambientali.

Da tali considerazioni scaturisce il bisogno di valutare e ridurre i rischi e le emergenze urbane e territoriali in termini di inquinamento atmosferico ed acustico, cambiamento climatico, incidentalità e congestione, agendo sulla domanda di mobilità, fornendo un valido supporto alle decisioni e realizzando servizi di infomobilità attraverso l'utilizzo degli ITS.

La ricerca svolta si muove proprio in questa direzione ed uno degli obiettivi consiste, appunto, nella progettazione e realizzazione di un sistema di monitoraggio, stima e previsione del traffico nell'area urbana di Catania, la cui architettura e funzionalità sono descritte ed analizzate nei paragrafi successivi.

## 5.2 Il sistema di supervisione del traffico e servizi di infomobilità di Catania

Il sistema di supervisione del traffico realizzato a Catania è un sistema di monitoraggio, stima e previsione del traffico in tempo reale, che consente di conoscere lo stato attuale dell'intera rete di trasporto e di effettuare delle previsioni di traffico, al fine di valutare delle opportune strategie di controllo, passando così da un approccio reattivo della gestione del traffico, ad uno di tipo proattivo, dalla protezione alla prevenzione. Oltre a fornire supporto alle decisioni, è in grado di offrire servizi dinamici di infomobilità e di dare informazioni real-time agli utenti sullo stato del traffico e suggerire, quindi, il percorso migliore da seguire.

Questo sistema ITS è costituito da un livello periferico ed un livello centrale, connessi tra loro da un livello di comunicazione (Figura 5.1).

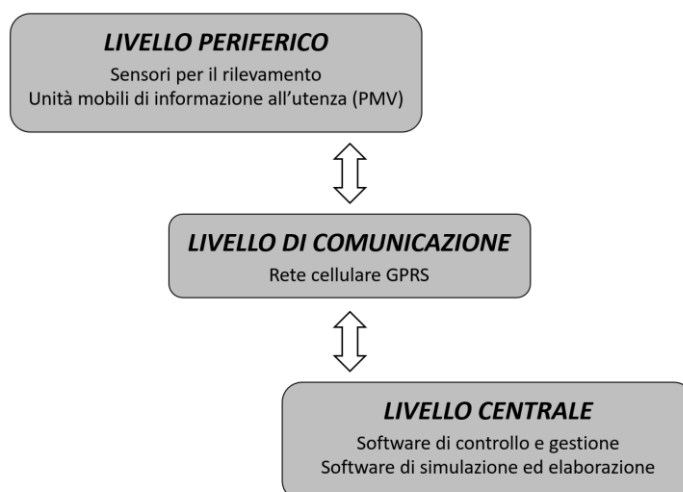


Figura 5.1 Livelli del sistema ITS di Catania

Il *livello periferico* è rappresentato dal sistema di monitoraggio del traffico, costituito da sensori di rilievo installati sull'infrastruttura stradale, e dalle unità mobili di informazione all'utenza (PMV) per fornire servizi di infomobilità.

Il *livello di comunicazione* è costituito da una rete cellulare GPRS che connette le singole postazioni del sistema periferico al sistema centrale senza bisogno di cablaggi, permettendo, così, di gestire le periferiche installate sul campo da remoto e una trasmissione dei dati rilevati continua ed in tempo reale.

Il *livello centrale*, installato su unità server di elevate prestazioni e capacità di archiviazione, è costituito da un software di controllo e gestione, che permette di poter controllare e gestire in tempo reale il funzionamento di tutte le periferiche implementate

(postazioni di rilevamento del traffico e sistemi di informazione all'utenza) e le apparecchiature ad esse correlate (stato dei sistemi di comunicazione, di alimentazione, batterie e regolatori di carica), e da un software di elaborazione e simulazione, per elaborare i dati raccolti sul campo, estendendoli sull'intera rete, e realizzare in tempo reale un'analisi delle prestazioni della rete stessa (in termini di tempi di percorrenza ed eventuale presenza di congestione) stimando, inoltre, previsioni di traffico utili a successive elaborazioni e fornitura di servizi di tipo dinamico.

L'assoluto vantaggio di questo sistema è dato, quindi, dalla raccolta, elaborazione e diffusione dei dati in Real-Time, e dalla loro elaborazione e messa in linea in tempo reale.

Il sistema è in grado, in generale, di lavorare con i dati provenienti da varie fonti disponibili ed inoltre, di fornire i servizi ottenuti come risultato delle elaborazioni di tali informazioni, a tutti gli utenti che ne fanno richiesta. Questa caratteristica è molto importante, in quanto rappresenta la completa diffusione delle informazioni ed apertura completa del sistema, come per altre tecnologie dell'informazione e della comunicazione che si stanno sviluppando, oggi, molto rapidamente.

Il funzionamento di tale sistema ITS può essere schematizzato, dunque, in tre fasi (Figura 5.2):

- una fase di *input*;
- una fase di *elaborazione*;
- una fase di *output*.

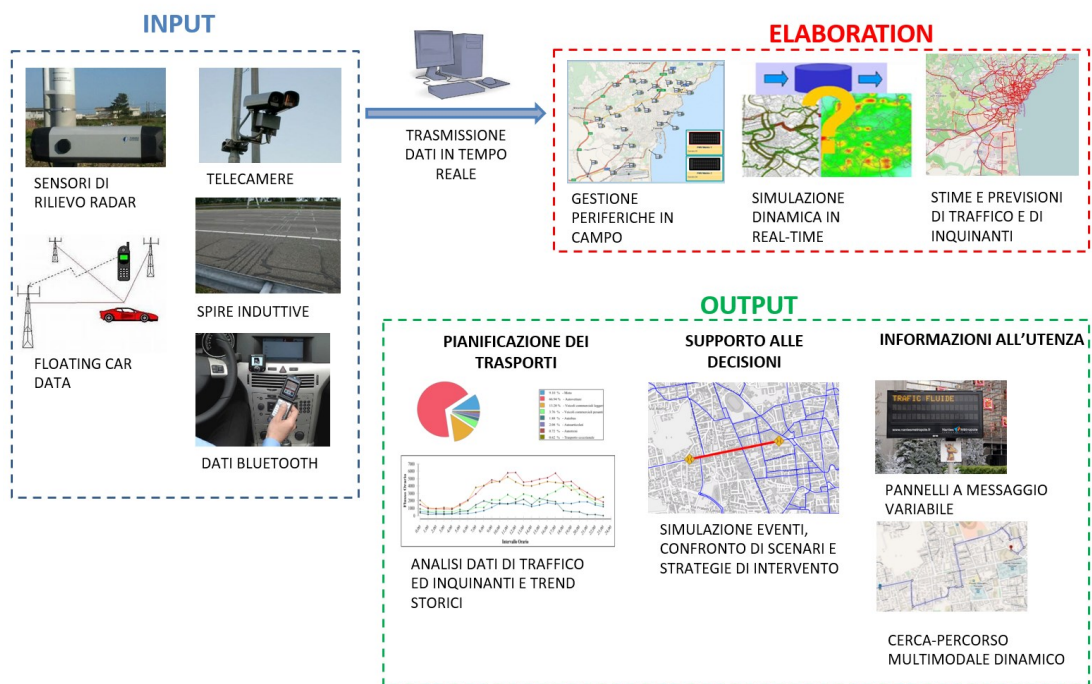


Figura 5.2 Schema delle fasi di funzionamento del sistema ITS di Catania

I sistemi di input (sensori di rilievo radar, telecamere, spire induttive, floating car data e dati bluetooth, etc.) rilevano i dati di traffico in tempo reale. Questi vengono raccolti, filtrati ed elaborati dal sistema di elaborazione, per essere infine trasformati in informazioni utili ad essere lette ed interpretate dagli operatori e successivamente utilizzate dagli utenti.

Questa fase di elaborazione è realizzata da software che, sulla base dei dati di input e di dati contenuti nei database storici, modellizzano le condizioni attuali del traffico e ne prevedono quelle future.

Infine, in funzione di tali informazioni, i sistemi di output forniscono supporto alle decisioni, in fase sia di pianificazione che di gestione, ed inviano informazioni ai veicoli ed ai guidatori e/o intervengono in maniera attiva sulla regolazione del traffico e sull'esercizio della rete di trasporto.

## 5.3 Descrizione funzionale ed architettura del sistema ITS

Il sistema ITS di Catania è costituito da:

- 29 sensori *Mobiltraf300* per il monitoraggio del traffico, misurazione dei flussi transitanti sulla rete e rilievo della composizione della flotta veicolare;
- 2 unità mobili di informazione all'utenza *Falcon 03*, da posizionare sulla rete per la fornitura di servizi di infomobilità;
- software *MMobility*, per la gestione da remoto dei sensori e l'elaborazione dei dati da essi rilevati;
- software *Visum*, per la costruzione e calibrazione off-line del modello, utilizzato da Optima;
- software *Optima*, per la stima e la previsione on-line delle prestazioni della rete, attraverso la combinazione di un modello di assegnazione dinamica e l'integrazione, in tempo reale, delle misure di traffico e degli eventi presenti sulla rete;
- cerca-percorso dinamico intermodale e multimodale, *Hyperpath*, capace di determinare il percorso minimo sulla rete di trasporto, prendendo in considerazione le condizioni real-time e future della rete di trasporto;
- modulo ambientale *Habitat* (di recente implementazione), basato sul modello COPERT4, per il calcolo dinamico delle emissioni prodotte dal traffico veicolare stimato.

Il sistema sopra descritto, su tutta la rete di competenza e in Real-Time, è in grado di svolgere le seguenti funzioni:

- stima le condizioni del traffico tenendo conto, anche, di eventuali situazioni anomale (congestioni, incidenti, etc.);
- effettua previsioni sullo stato del traffico;
- stima i tempi di percorrenza sulla rete di assegnazione;
- produce e divulga informazioni per l'utenza coerenti con l'obiettivo di gestione ottima del traffico veicolare (politiche informative) attraverso diversi canali (PMV, cellulare, portale interattivo on-line);
- simula differenti scenari alternativi fornendo, così, un valido supporto alle decisioni;
- è inoltre in grado di fornire (in accordo con le politiche informative finalizzate alla gestione ottima del traffico) itinerari dinamici basati sulle stime dello stato attuale della rete e sulle previsioni, mediante un cerca-percorso multimodale dinamico;
- permette un calcolo delle emissioni inquinanti associate al traffico veicolare sulla base delle stime e previsioni di traffico.

La Figura 5.3 schematizza l'architettura del sistema ITS di Catania:

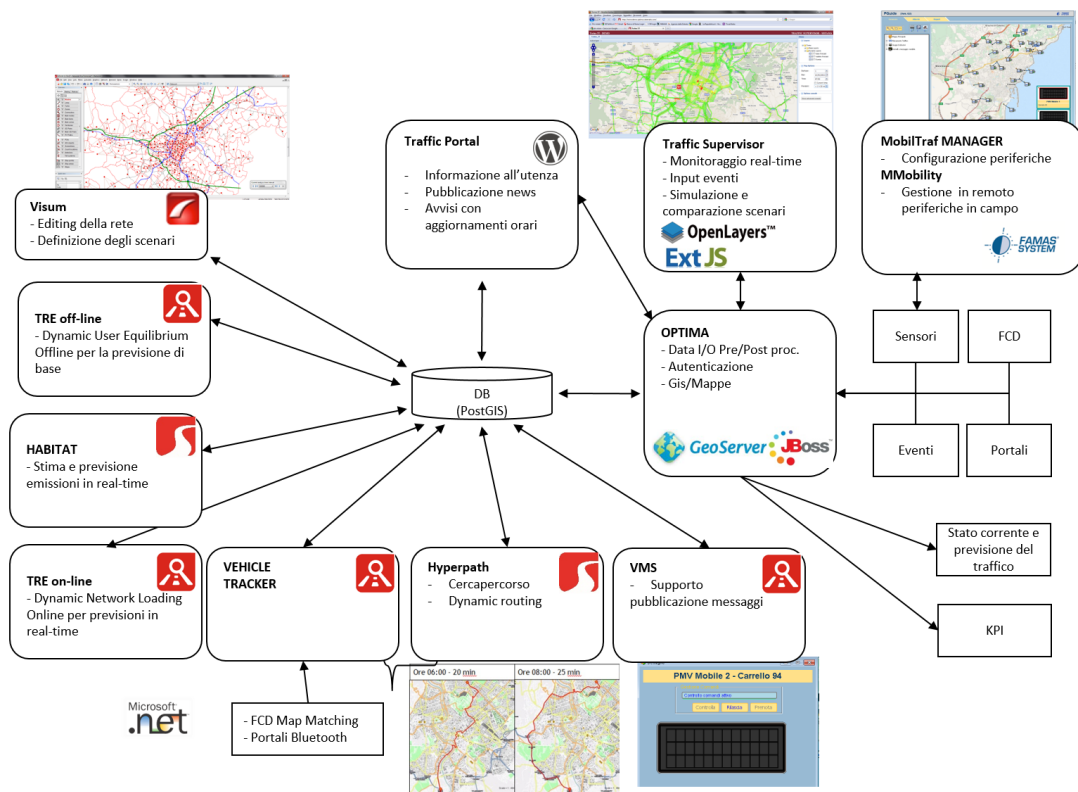


Figura 5.3 Architettura del sistema ITS di Catania

La base iniziale dei dati di traffico è essenzialmente costituita dall'apporto continuo dei dati provenienti dai *floating car data* e dall'insieme dei flussi di traffico rilevati dai *sensors*

installati sull'infrastruttura, che sono stati configurati in campo mediante il software *MobilTrafMANAGER* e sono gestiti da remoto tramite l'interfaccia *MMobility*.

Questi dati, insieme a quelli relativi ad eventuali eventi anomali presenti sulla rete, vengono acquisiti in tempo reale da *Optima*, che rappresenta il "cervello" del sistema, all'interno del quale vengono effettuate le simulazioni per le stime e previsioni on-line del traffico. Per quanto attiene la simulazione, sulla base della domanda di mobilità (matrici O/D) e delle caratteristiche dell'offerta di trasporto (grafo ed eventuali eventi), ed in accordo con le misure provenienti dalla strada, la funzione determina la distribuzione real-time dei flussi veicolari sulla rete di competenza, stimando i tempi di percorrenza e le condizioni di deflusso su tutti gli elementi del grafo di assegnazione.

Queste elaborazioni vengono riversate all'interno di un database, mediante uno scambio continuo di dati tra il server centrale del sistema e *Optima*, in modo tale da alimentare dei moduli aggiuntivi, come ad esempio il modulo ambientale *Habitat*, per la stima delle emissioni inquinanti, e il cerca-percorso dinamico multimodale *Hyperpath*.

*Optima* presenta, inoltre, due interfacce: una dedicata all'operatore – *Traffic Supervisor* – e un'interfaccia utente – *Traffic Portal*, mediante le quali è possibile visualizzare su mappa, in maniera immediata, la situazione attuale e futura della rete, le velocità di percorrenza ed eventuale presenza di congestione o eventi anomali.

Quest'architettura costituisce, così descritta, la parte on-line del funzionamento di *Optima*. Sulla sinistra, è invece rappresentata la parte off-line, che si avvale dell'ausilio del software *Visum* per le operazioni di editing della rete e di definizione degli scenari, nonché della procedura di assegnazione per il calcolo delle previsioni di base.

Di seguito sono analizzate le singole componenti del sistema.

### **5.3.1 Unità di rilevamento e controllo MobilTraf300**

Le unità di rilevamento e controllo sono costituite da: un apparato di rilevamento, concentrazione e archiviazione di dati di traffico *Mobiltraf 300 Compact*, con regolatore di carica integrato e batteria ricaricabile; da un rilevatore integrato di apparati Bluetooth; da un modulo di localizzazione GPS, da un modulo di comunicazione dati via rete GPRS e da un sistema di alimentazione a pannello fotovoltaico.

Le apparecchiature *Mobiltraf 300* sono dotate delle più recenti tecnologie disponibili nel campo delle microonde a frequenza radar a 24 GHz, dell'analisi dei segnali e delle comunicazioni in locale ed in remoto, offrendo contemporaneamente grande flessibilità di impiego, basso consumo energetico ed elevata precisione di misura. L'apparato è, inoltre, di tipo stand-alone, cioè funziona in maniera autonoma, ed è composto al suo interno dai sensori, l'elettronica che li governa e il sistema di alimentazione misto a batteria e con



pannello fotovoltaico.

MobilTraf300 ha una forma compatta ed è composto da un corpo centrale realizzato in alluminio, al cui interno alloggia il pacco batterie rimovibile, ed alle estremità della parte centrale metallica si trovano i due sensori a microonde contenuti in custodie in materiale plastico. L'utilizzo della doppia antenna consente di restringere l'area di rilevamento, riducendo la possibilità della presenza di più veicoli contemporaneamente nell'area, evitando, così, quegli errori che spesso accadono per le aree di rilevamento ampie tipiche di apparati a singola antenna.

Nelle immagini sottostanti (Figura 5.4 e Figura 5.5) è raffigurato il MobilTraf300 nella versione "compact", utilizzato per la realizzazione del sistema di monitoraggio di Catania, che prevede un unico pacco batterie.



Figura 5.4 Vista frontale MobilTraf300 versione "compact"



Figura 5.5 Vista posteriore MobilTraf300 versione "compact"

I sensori utilizzati nella realizzazione di questo strumento sfruttano, come già detto prima, le proprietà nel campo delle microonde di riflessione dei veicoli. Quando un veicolo, di qualunque tipologia, attraversa il campo elettromagnetico generato dai due sensori MobilTraf300, questo è in grado di rilevare i seguenti dati relativi al transito di ciascun veicolo:

- data/ora del passaggio;
- direzione di marcia;
- corsia di transito;
- velocità in km/h;
- lunghezza in cm;

- gap: distanza temporale (in centesimi di secondo) tra la coda e la testa di 2 veicoli consecutivi;
- headway: distanza temporale (in centesimi di secondo) tra la testa e la testa di 2 veicoli consecutivi;
- veicolo fermo;
- tempo di occupazione della corsia.

Il dispositivo è in grado di gestire 1 o 2 corsie. Tuttavia, può essere soggetto al fenomeno dell'*oscuramento radar* nel caso in cui viene impiegato un unico apparato per il monitoraggio di due corsie in ambiti operativi in cui si registra un traffico intenso. Tale fenomeno occorre quando un veicolo "oscura" la "visibilità" di un altro veicolo transitante sulla corsia adiacente, impedendo così il corretto rilevamento del transito sulla corsia più lontana. Comunque, dall'analisi statistica dei dati effettuata (affrontata nel paragrafo 5.9.1 successivo), è emerso che il sistema di monitoraggio realizzato a Catania presenta un'elevata affidabilità di rilievo, superiore al 95%, pertanto questo fenomeno può essere considerato trascurabile.

La modalità operativa realizzata prevede un'installazione di tipo semipermanente per una campagna di rilevamento di durata medio lunga.

L'apparato è impiegato in rete di comunicazione GPRS, inviando i dati al centro remoto di elaborazione e controllo in maniera completamente automatica: i dati acquisiti sono, dunque, immagazzinati in loco, registrati su file, con un intervallo di interruzione configurato pari a 5 minuti, che permette la chiusura di questi file dati, e trasmessi alla centrale operativa remota ad intervalli regolari di 5 minuti.

Essendo tale sistema georeferenziato, mediante un ricevitore GPS interno, tutti i file sono corredati di coordinate GPS ed i dati, ivi contenuti, sono così facilmente associati al grafo della rete stradale utilizzato nell'ambiente di Optima.

### **5.3.2 Applicativo MobilTraf MANAGER**

*Mobiltraf MANAGER* è un software applicativo che, per mezzo di un'interfaccia grafica, permette di visualizzare i dati rilevati dalla stazione di misura e di configurarne i vari parametri.

Nello specifico, tale applicativo permette la visualizzazione dello stato del dispositivo (valori diagnostici, info relative ad orologio/GPS/batteria/informazioni di sistema) e dei dati rilevati, anche in modalità aggregata per una loro facile ed immediata interpretazione, ed è stato utilizzato per la configurazione e l'impostazione dei parametri tecnici dei MobilTraf300 installati in campo.

Dopo aver connesso il Mobiltraf MANAGER al sensore, è stato possibile accedere alle

varie sezioni del programma che permettono la diagnostica e la programmazione e configurazione del MobilTraf300. Di seguito, sono presentate alcune delle finestre più importanti di questo applicativo.

La Figura 5.6 mostra la videata della sezione “Stato”, suddivisa in 3 colonne:

- *valori diagnostici*: quali tensione di alimentazione, temperatura interna al dispositivo, tensione in ingresso al dispositivo durante la fase di ricarica delle batterie attraverso l'alimentazione esterna (da pannello fotovoltaico), la versione del firmware della scheda elettronica di controllo del sistema;
- *periferiche*: data ed ora registrati sul dispositivo, stato acceso o spento, registrazione, livello e qualità del segnale GPS;
- *altro*: parametri relativi al sistema e alla capacità di memoria.

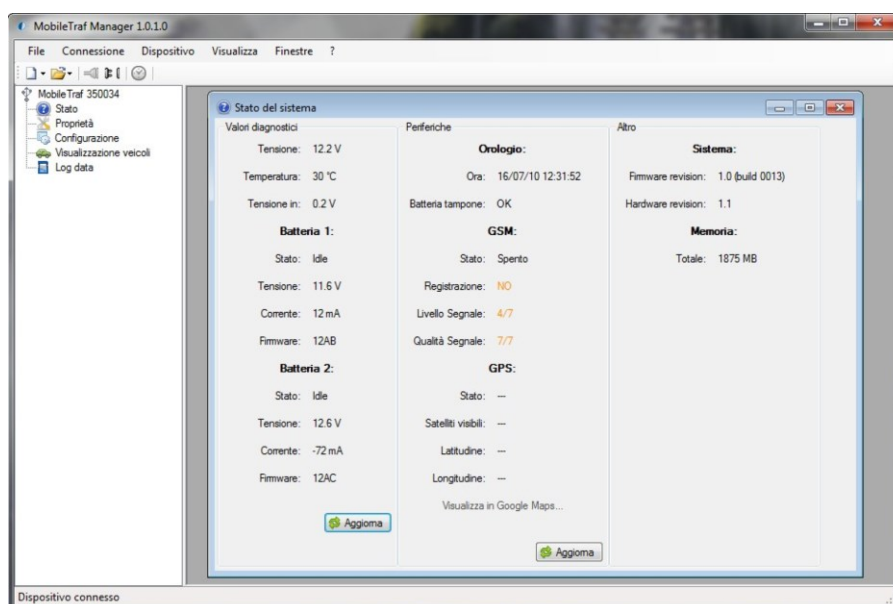


Figura 5.6 Videata della sezione “Stato”

La Figura 5.7 mostra, invece, la videata della sezione “Proprietà”, che risulta suddivisa in 3 parti:

- *info stazione*: questa sezione ha permesso la configurazione dei parametri relativi alla postazione, ed in particolare il nome e il codice identificativo;
- *funzionamento*: utilizzata per visualizzare informazioni di stato relative al funzionamento del dispositivo e impostare alcuni parametri, nonché, abilitare o disabilitare il funzionamento generale dell'apparato; inoltre, nella parte “programmazione” è stato il periodo di rilevamento in cui i dati rilevati da MobilTraf300 vengono registrati in file di Log;

- *limite di rilevamento*: rappresenta la terza sezione essenziale per calibrare lo strumento durante la messa in funzione, che è consistita nel delimitare il raggio d'azione dei sensori, per far sì che eventuali veicoli in movimento al di là della o delle corsie monitorate (ad esempio un parcheggio o una pista ciclabile, ecc.) possano disturbare il rilevamento. La sezione consiste in un sistema di riferimento cartesiano dove in ordinate si ha la distanza (adimensionale, non corrispondente alla distanza effettiva in metri) e in ascisse il livello del segnale (anch'esso adimensionale), come mostrato in Figura 5.7. Utilizzando il cursore a destra degli assi cartesiani, a seconda della sezione di rilevamento analizzata, si è spostata la linea di confine (linea rossa) che delimita il limite di rilevamento, oltre il quale MobilTraf300 non rileva alcun veicolo. Il rettangolo verde, parallelo all'asse delle ascisse, in corrispondenza di un valore in ordinate, rappresenta il passaggio di un veicolo. La lunghezza del rettangolo indica l'intensità del segnale riflesso dal veicolo rilevato, quindi rettangoli più lunghi indicano veicoli di massa maggiore. In questo caso, questa procedura di regolazione del segnale di rilevamento è stata eseguita per tutte le sezioni di installazione, implicando, di volta in volta, l'impostazione del limite di rilevamento massimo necessario.

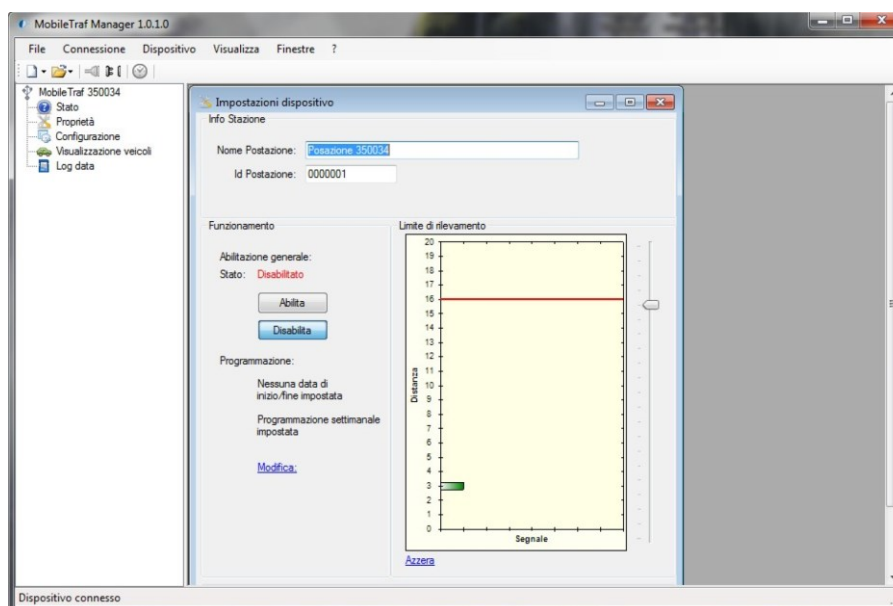


Figura 5.7 Videata della sezione “Proprietà”

Infine, le figure successive mostrano, rispettivamente, le finestre per la visualizzazione dei dati in tempo reale e dei file di log. In particolare, nella Figura 5.8 è possibile vedere i valori rilevati da MobilTraf300 ad ogni transito veicolare: il numero progressivo, l'ora del transito, la velocità, la corsia, la direzione di marcia, la lunghezza, l'headway e il gap.

Numero	Ora	Velocità (km/h)	Corsia	Direzione	Lunghezza...	Hdw (s)	Gap (s)
224	15:35:43	46	2	2	237	0.6	0.5
223	15:35:43	53	2	2	250	1.1	1.0
222	15:35:41	56	2	2	195	1.2	0.9
221	15:35:40	52	2	2	507	14.8	14.1
220	15:35:34	49	1	1	313	2.4	2.3
219	15:35:32	45	1	1	191	1.5	0.4
218	15:35:31	46	1	1	1403	3.8	3.6
217	15:35:27	50	1	1	385	18.1	17.9
216	15:35:25	59	2	2	1274	41.5	41.0
215	15:35:09	62	1	1	408	2.6	2.4
214	15:35:06	57	1	1	347	49.9	49.8
213	15:34:44	49	2	2	702	8.9	8.7
212	15:34:35	67	2	2	483	41.0	41.0
211	15:34:16	55	1	1	225	11.8	11.2

Figura 5.8 Finestra per la visualizzazione dei dati in tempo reale

Nella Figura 5.9 è visualizzata, invece, la lista dei file di Log salvati nel dispositivo, con la possibilità di selezionare ed aprire i file precedentemente archiviati in memoria. Inoltre, sono contenuti i parametri relativi alla trasmissione di questi dati, in particolare, allo stato di scaricamento dalla memoria e all'intervallo di inizio e fine acquisizione da parte del sistema centrale.

Nome	Stato	Dimensione	Inizio Intervallo	Fine Intervallo
dat00542.mtl	unretrieved	21 KB	21/09/2010 11.28.05	21/09/2010 11.28.04
dat00535.mtl	unretrieved	52 KB	17/09/2010 8.45.02	17/09/2010 17.10.59
dat00536.mtl	unretrieved	52 KB	17/09/2010 17.11.00	18/09/2010 11.16.59
dat00537.mtl	unretrieved	52 KB	18/09/2010 11.17.00	18/09/2010 23.40.05
dat00538.mtl	unretrieved	52 KB	18/09/2010 23.40.06	19/09/2010 16.49.16
dat00539.mtl	unretrieved	52 KB	19/09/2010 16.49.17	20/09/2010 8.59.45
dat00540.mtl	unretrieved	52 KB	20/09/2010 8.59.46	20/09/2010 18.10.05
dat00541.mtl	unretrieved	52 KB	20/09/2010 18.10.06	21/09/2010 11.28.04

Figura 5.9 Finestra per la visualizzazione dei file di log

### 5.3.3 Sistema di informazione all'utenza – PMV Falcon 03

Il sistema di informazione all'utenza *Falcon 03* è composto da un Pannello a Messaggio Variabile (PMV) di tipo alfanumerico da 3 righe a 12 caratteri, in grado di rappresentare informazioni esclusivamente composte da caratteri alfanumerici e segni di punteggiatura. Il PMV è installato su un carrello appositamente progettato e brevettato, semplice da muovere e da usare, particolarmente indicato nei casi di situazioni di emergenza o in tutte quelle situazioni dove il traffico deve essere controllato e monitorato (Figura 5.10).



Figura 5.10 Sistema di informazione all'utenza *Falcon 03*

La visualizzazione dei messaggi è realizzata mediante un tabellone led a messaggio variabile monocromatico, in grado di visualizzare notizie sullo stato della viabilità trasmesse in Real Time.

Questi sistemi di informazione all'utenza sono, infatti, governati dalla centrale operativa dove, in funzione delle informazioni che pervengono dal sistema monitoraggio stradale, vengono attuate le strategie di impiego e vengono composti i messaggi da inviare agli utenti.

Questo dispositivo è, pertanto, particolarmente efficace per inviare messaggi in tempo reale, anche quando non sono memorizzati nel pannello, attraverso il canale di trasmissione GPRS che ne consente il controllo e il monitoraggio da remoto.

### 5.3.4 Centrale operativa di controllo

La centrale operativa di controllo è costituita da:

- *MMobility*, per il controllo da remoto e l'elaborazione dei dati provenienti dalle periferiche installate in campo, quali i sensori di rilevamento del traffico, e per la gestione dei pannelli a messaggio variabile (PMV);

- *Optima*, per il calcolo delle stime e previsioni di traffico on-line, mediante la combinazione di un modello di assegnazione dinamica con le misure di traffico e gli eventi in tempo reale.

Il collegamento tra i due software è garantito da un protocollo di interscambio DATEXII/Web-service, attraverso il quale qualsiasi sistema terzo abilitato può accedere sia ai dati di traffico rilevati che ai dati elaborati.

### 5.3.4.1 MMobility

Il software *MMobility* è organizzato in strati funzionali con compiti ben precisi per garantire la massima affidabilità e prestazioni ottimali nel contesto di utilizzo.

Lo *strato di comunicazione* è costituito da una serie di processi di comunicazione che vengono attivati nei confronti delle periferiche installate. In generale, questo modulo garantisce un'elevata flessibilità di comunicazione anche con altre periferiche di varia provenienza e di vario tipo, risultando facilmente gestibile, inoltre, la ricezione diretta di dati da fonti diverse già presenti sul territorio oppure di successiva installazione.

Lo *strato di uniformazione dati* è costituito da processi driver che hanno il compito di privare i messaggi provenienti dalla periferica dalle informazioni di protocollo e formattazione e di preparare i dati in modo che possano essere trasmessi allo strato di supervisione in maniera standardizzata ed uniforme. Viceversa, per i dati da inviare al campo il driver prende in ingresso il dato standardizzato proveniente dallo strato di supervisione, lo trasforma e lo inserisce nel rispettivo protocollo in modo da poter essere gestito dallo strato di comunicazione.

Elemento centrale dello *strato di supervisione* è il processo Supervisore. Esso provvede a distribuire i dati ricevuti dallo strato di uniformazione dati ai vari processi, tra cui quello di gestione dei dati storici, delle informazioni di diagnostica, delle coerenze e del database. Inoltre il processo Supervisore gestisce a sua volta la trasmissione di comandi allo strato di uniformazione dati.

Lo *strato di controllo* è costituito da una serie di processi che gestiscono la funzionalità di sistema e di interazione con l'operatore. Rientrano tra i primi ad esempio i processi di gestione dei dati di traffico e di gestione dei pannelli a messaggio variabile. Per quanto riguarda invece i processi di interazione con l'operatore si possono menzionare quelli che si occupano di mantenere sincronizzata l'interfaccia grafica con lo stato del sistema.

Infine, lo *strato di esportazione/interfacciamento* interagisce come accennato con gli altri sistemi attraverso protocollo DATEX II, rendendo possibile l'invio delle informazioni raccolte a livello locale al centro di supervisione.

MMobility presenta, in generale, una struttura modulare. I moduli specifici implementati con le postazioni di traffico e le postazioni PMV sono i seguenti:

- *Modulo Gestione Postazioni Traffico* che gestisce i dati di traffico acquisiti dalle postazioni periferiche. Esso fornisce la visualizzazione delle periferiche nel contesto territoriale e permette l'interrogazione di diversi parametri attraverso un sistema a query guidato.
- *Modulo Gestione Postazioni PMV* che gestisce i singoli Pannelli a Messaggio Variabile e ne permette la configurazione. Esso consente la visualizzazione grafica della localizzazione dei pannelli sul territorio, la loro gestione interattiva, la pianificazione temporale dei messaggi e la diagnostica e controllo dello stato operativo.

La Figura 5.11 mostra la schermata principale del software MMobility. Essa può essere suddivisa in quattro parti.

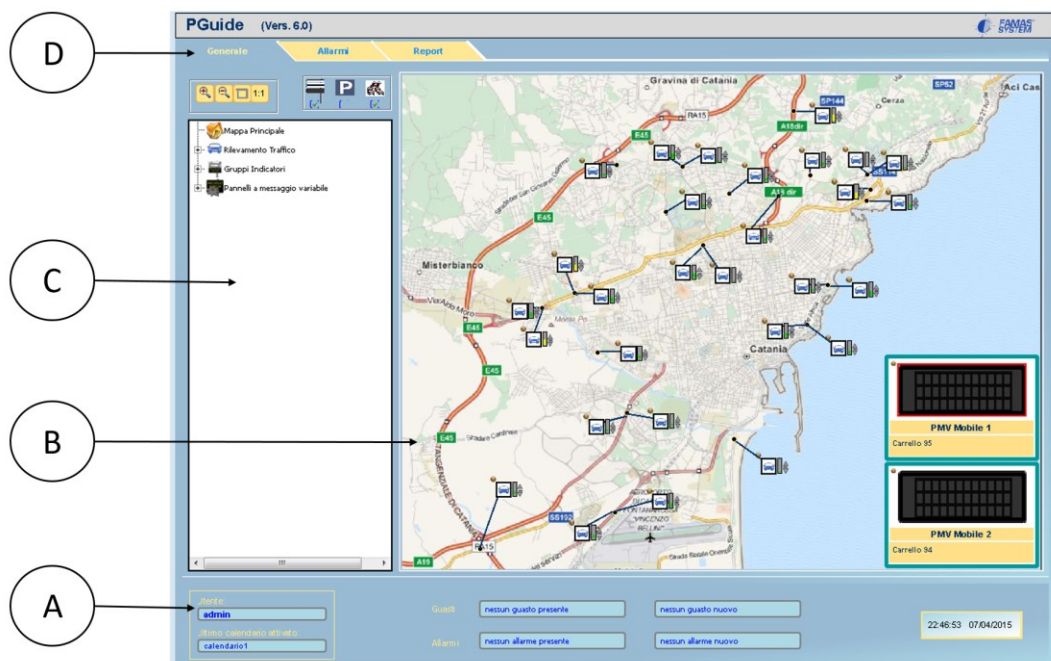


Figura 5.11 Schermata principale di MMobility

La parte inferiore A è sempre visualizzata, ed in essa si trovano alcune informazioni generali del sistema, come ad esempio il nome dell'utente che ha effettuato l'accesso al sistema, l'ultimo calendario attivato e i segnali di guasto e di allarme attivati e non tacitati.

Nella zona centrale-destra B si ha un'interfaccia grafica costituita da una pianta della zona di interesse, con il dettaglio delle vie principali dell'area urbana di Catania oggetto di studio. Su questa mappa sono localizzate, tramite icone dinamiche, tutte le periferiche gestite mediante MMobility. È possibile avere, in tal modo, un sinottico di visualizzazione e



controllo centralizzato che permette di avere una visione d'insieme dei vari componenti del livello periferico del sistema e la relativa disposizione.

L'utilizzo di icone dinamiche, inoltre, permette di visualizzare anche eventuali condizioni di guasto o allarme per un tempestivo intervento di manutenzione o pianificazione dello stesso, minimizzando i tempi di "fuori servizio" di rilevante importanza soprattutto nei casi di utilizzo dei pannelli a messaggio variabile.

In particolare, le icone rappresentative delle varie sezioni di monitoraggio indicano graficamente il numero e lo stato delle corsie monitorate e il trend medio del traffico presente su di esse.

Nella fascia laterale sinistra C è possibile selezionare il tipo di visibilità sulla mappa, singola o contemporanea, degli elementi implementati nel sistema di monitoraggio e controllo: in questo caso delle postazioni di rilevamento del traffico e dei pannelli a messaggio variabile.

Infine, la fascia superiore D è caratterizzata da un menù a schede dove, oltre alla scheda generale di visualizzazione e supervisione del sistema periferico, prima descritta, con gestione tramite sinottico, è possibile selezionare la scheda degli allarmi e la scheda dei report.

Le elaborazioni disponibili, sia di natura grafica che in formato tabellare, sono molteplici:

- elenco dei singoli veicoli (con criteri di filtro sui dati di velocità, lunghezza, classe e distanza intercorsa dal veicolo precedente - gap);
- andamento del traffico nel tempo (per una o più corsie stradali su base giornaliera, settimanale e mensile);
- distribuzione dei veicoli (numero e percentuale dei veicoli che hanno percorso la sezione stradale in un determinato periodo di tempo con criteri di filtro su sito, direzione di marcia, corsie da includere e periodo di tempo considerato);
- andamento medio mensile dei flussi di traffico;
- curva di flusso della trentesima ora;
- elaborazione delle velocità;
- tipologia veicolare;
- percentuale dei livelli di servizio, ecc.

La Figura 5.12 mostra un esempio di report generato mediante MMobility per una delle postazioni di rilievo installate sull'infrastruttura stradale della città di Catania: con riferimento ad uno specifico periodo di analisi selezionato, a partire dai flussi di traffico rilevati, è determinata la distribuzione dei veicoli suddivisa nelle 8 differenti classi veicolari individuate dal sensore in fase di rilievo.

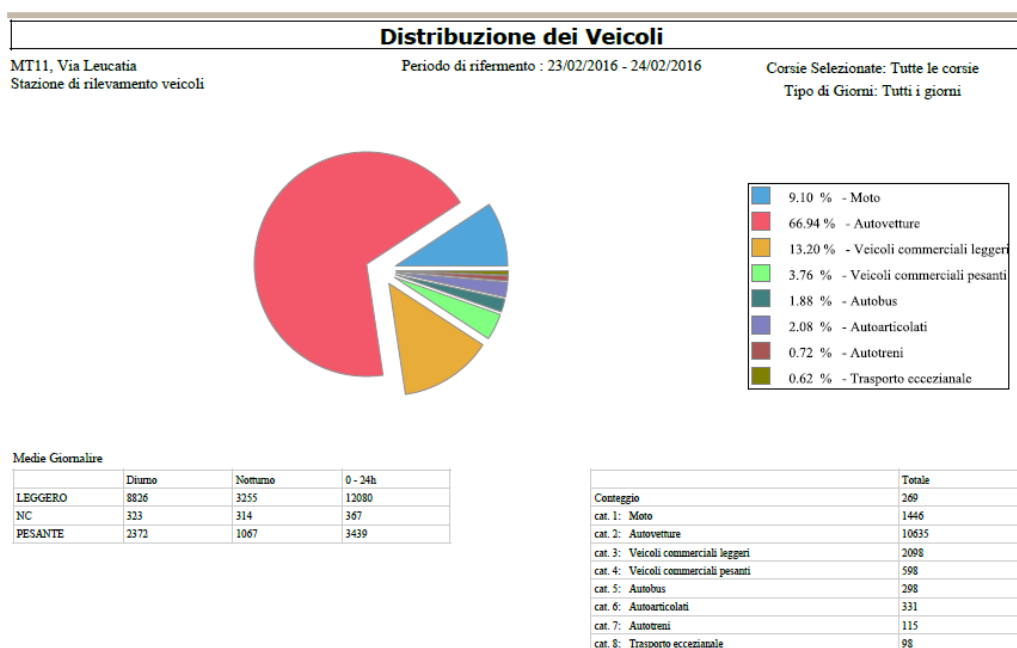


Figura 5.12 Esempio di report – Distribuzione dei veicoli

La simulazione delle stime di traffico e delle previsioni a breve e lungo termine dello stato della rete sono simulate, invece, mediante il software Optima, che verrà descritto nel paragrafo successivo.

### 5.3.4.2 Optima – Optimal Path Travel Information for Mobility Actions

OPTIMA è un software per il monitoraggio, la stima e la previsione dell'utilizzo (flussi di veicoli) e delle prestazioni (tempi di percorrenza) sull'intera rete stradale, in base a misure di traffico sia puntuali che estese su tutta la rete (sensori di rilievo radar e floating car data, nel caso di Catania), finalizzata alla gestione della mobilità e al controllo del traffico, all'infomobilità e, in generale, all'ottimizzazione del sistema di trasporto.

In particolare, OPTIMA si avvale di modelli ed algoritmi avanzati per l'assegnazione dinamica della domanda di trasporto alle reti stradali, i quali consentono di stimare i tempi di percorrenza, i flussi di traffico e le code di veicoli nella loro variazione durante la giornata, anche a partire da un numero di osservazioni sullo stato della congestione estremamente ridotto rispetto alle altre metodologie esistenti, basate tipicamente sull'inferenza statistica delle misurazioni.

OPTIMA si basa su delle stime a priori dell'evoluzione del traffico durante ciascun giorno-tipo, che vengono realizzate attraverso una simulazione dell'intero sistema di

trasporto, in grado di riprodurre le scelte di percorso dei conducenti che viaggiano sulla rete stradale congestionata, da un'origine ad una destinazione, in istanti specifici. Successivamente, le misure in tempo reale vengono utilizzate per calibrare ed "aggiustare" questo modello, correggendo le stime di base con le condizioni correnti del traffico, fornendo così una previsione molto più robusta ed affidabile.

La procedura di previsione del traffico si articola, sostanzialmente, in tre moduli principali, cui sono demandate le funzioni di acquisizione ed elaborazione dei dati; simulazione del deflusso veicolare e aggiornamento delle previsioni di traffico (Figura 5.13).

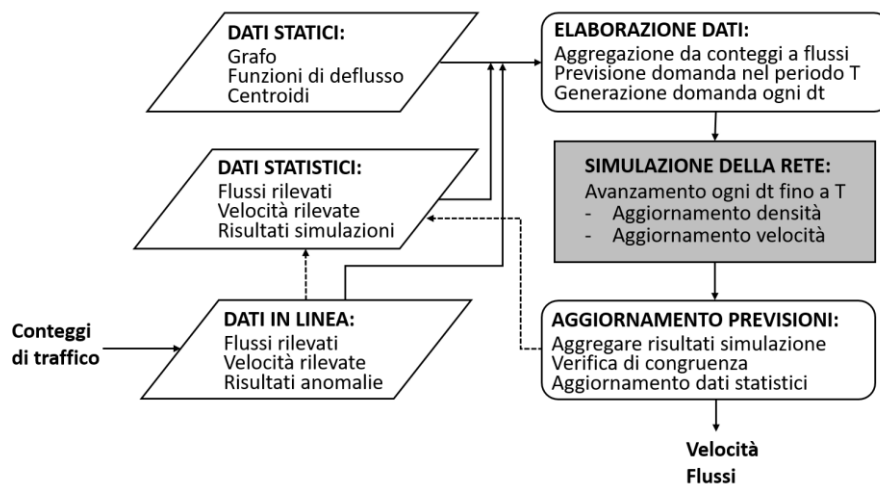


Figura 5.13 Moduli principali per la procedura di previsione del traffico

L'acquisizione dei dati è un'operazione 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.

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

Dunque, da un punto di vista funzionale, il sistema OPTIMA si compone di una parte off-line e di una parte on-line (Figura 5.14).

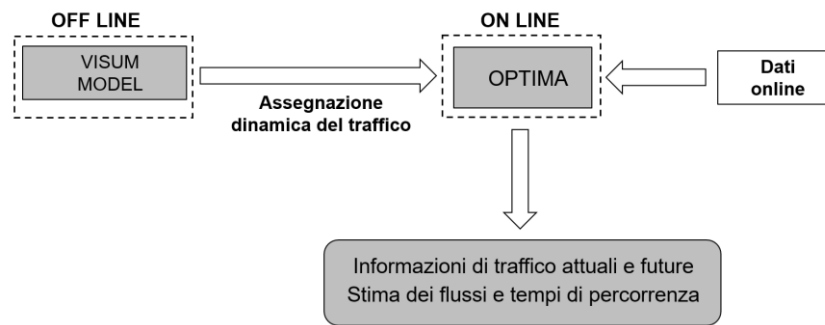


Figura 5.14 Parte off-line e parte on-line di OPTIMA

La parte off-line, avvalendosi del software Visum, è sostanzialmente dedicata alla costruzione e alla calibrazione del modello, utilizzato nella parte on-line. La domanda di trasporto viene rappresentata attraverso matrici origine-destinazione e la definizione di differenti segmenti di domanda sia per il trasporto individuale che per quello collettivo, consentendo, così, la modellazione di una rete plurimodale. Gli archi del grafo sono, invece, rappresentati tramite una polilinea in modo da riprodurre l'effettivo andamento planimetrico dell'asse dell'infrastruttura. Ogni arco è definito mediante diversi parametri, quali il numero identificativo, la tipologia, i sistemi di trasporto su di esso abilitati, la lunghezza, la capacità, ecc.

A questo punto, la parte on-line combina il modello e gli stati di funzionamento di base con le misure e le informazioni continuamente provenienti dalla rete stradale, in un modello di simulazione del traffico in tempo reale. Tale modello ha il compito di correggere le stime e le previsioni di traffico da esso calcolate sulla base delle effettive condizioni di congestione registrate, generando, così, ogni pochi minuti una nuova stima e previsione del traffico. Sulla base di questi risultati, possono essere generate automaticamente notifiche relative ad eventi di traffico ed alle condizioni della viabilità attuale e prevista.

Riepilogando, le funzioni a cui assolve OPTIMA sono le seguenti:

- importare dati ed eventuali eventi relativi al traffico (flussi misurati, eventi accidentali) provenienti sensori installati sul campo;
- tracciare in modalità anonima sul grafo stradale un insieme di veicoli sonda (FCD) che circolano sulla rete, per ottenere nel continuo ed in tempo reale informazioni puntuali sulle velocità prevalenti lungo gli archi percorsi;
- desumere le condizioni di deflusso (densità) e quindi l'eventuale presenza di code sugli archi monitorati della rete stradale, a partire da rilevazioni del traffico (flusso o velocità) effettuate mediante sensori fissi e mobili;
- propagare sulla rete le correzioni, rispetto al numero di veicoli previsto dal modello di simulazione, ottenute tramite le rilevazioni effettuate su un limitato numero di archi, conseguendo l'essenze della misura nello spazio e nel tempo;

- ottenere una stima sempre aggiornata del traffico sull'intera rete stradale e della sua evoluzione futura, prevedendo in tempo reale i flussi e le code di veicoli, le velocità e i tempi di percorrenza su ciascun arco nel corso dell'intera giornata;
- fornire automaticamente ed in tempo reale tali stime ai sistemi per il controllo del traffico, al fine di aumentarne l'efficacia nella gestione della mobilità stradale;
- simulare scenari per la gestione di interventi in tempo reale calcolandone gli effetti in termini di indicatori sintetici, costituendo quindi un sistema di supporto alle decisioni (DSS) per creare o identificare la migliore strategia possibile di controllo e regolazione del traffico in base alle condizioni effettive osservate o previste sulla rete;
- fornire automaticamente ed in tempo reale stime ed informazioni ai sistemi di infomobilità (es. pannelli a messaggio variabile) al fine di direzionare i flussi, implementando, così, le strategie individuate per il controllo e regolazione del traffico ed il governo della mobilità.

OPTIMA incrementa, quindi, l'intelligenza del centro di controllo, costituendo la fonte dati e la base funzionale per le successive applicazioni ITS di controllo e regolazione del traffico, di governo della mobilità e di infomobilità.

Questo sistema, così concepito, è adatto per vari contesti metropolitani, dove la congestione è più forte e la variazione durante la giornata dei flussi e dei tempi non è trascurabile.

## **5.4 Fornitura ed installazione del sistema di monitoraggio**

Il complesso set-up per la messa a sistema delle attrezzature e dei software, descritti nei paragrafi precedenti, è stato caratterizzato dalle seguenti fasi:

- definizione dell'area di studio e la modellazione del grafo di rete;
- identificazione delle sezioni di posizionamento dei sensori;
- fornitura ed installazione del sistema di monitoraggio;
- implementazione e calibrazione del sistema centrale;
- integrazione nel modello di dati FCD (Floating Car Data);
- implementazione del cerca-percorso dinamico;
- implementazione e configurazione del modulo ambientale.

Espletate le operazioni relative alla fase di fornitura, prima di procedere alla fase successiva di installazione delle attrezzature e alla messa in atto del sistema, è stato necessario occuparsi di un'attività preparatoria abbastanza complessa ed articolata.

Inizialmente, in virtù delle caratteristiche di amovibilità delle attrezzature, si è proceduto

all’inventario delle stesse nel registro dell’Amministrazione Centrale d’Ateneo.

Inoltre, in considerazione del valore commerciale delle attrezzature e della tipologia di installazione, è stata avviata la procedura per stipulare un contratto di copertura assicurativa in caso di atti dolosi a carico delle attrezzature o furto delle medesime.

Da un punto di vista burocratico e amministrativo, si è reso necessario richiedere delle autorizzazioni per l’installazione dei sensori e per il rilievo dei dati di traffico. Nello specifico, in funzione delle sezioni di posizionamento delle attrezzature individuate, sono state predisposte le richieste di autorizzazione presso i seguenti enti e uffici di competenti:

- ANAS S.p.A., Sezione Compartmentale di Catania, Area Tecnica Esercizio;
- Provincia Regionale di Catania;
- Comune di Catania, Ufficio Traffico Urbano U.T.U;
- Direzione e Manutenzione Servizi Tecnici, Ufficio Pubblica Illuminazione.

Da un punto di vista tecnico, sono stati effettuati dei sopralluoghi per verificare la compatibilità tra le caratteristiche del sito di ciascuna sezione e la procedura di installazione delle attrezzature e le caratteristiche dei flussi di traffico da rilevare. Inoltre, in fase di sopralluogo, è stato verificato che l’installazione delle attrezzature non costituisse pericolo per la stabilità delle infrastrutture e degli apparati esistenti.

Sulla base dei rilievi eseguiti è stato realizzato un quaderno delle sezioni composto da 18 tavole, una per ciascuna sezione, contenenti la localizzazione della sezione e un accurato report fotografico realizzato in loco. A scopo esemplificativo, si riporta in Figura 5.15 la tavola relativa alla sezione 1 – Viale Presidente Kennedy.



Figura 5.15 Tavola del quaderno delle sezioni di posizionamento dei sensori

Infine, per permettere la trasmissione dei dati di traffico rilevati dalle apparecchiature al sistema centrale, è stato necessario richiedere l'acquisto di 31 schede SIM abilitate al traffico dati.

### 5.4.1 Individuazione dell'area di studio

L'area urbana della città di Catania costituisce l'area di studio nella quale è stato realizzato il sistema ITS. Tale area è rappresentata, a grandi linee, dalla porzione di territorio colorata di bianco, mentre con il colore grigio sono identificati i comuni limitrofi all'area urbana di Catania, che non rientrano all'interno dell'area di studio (Figura 5.16).

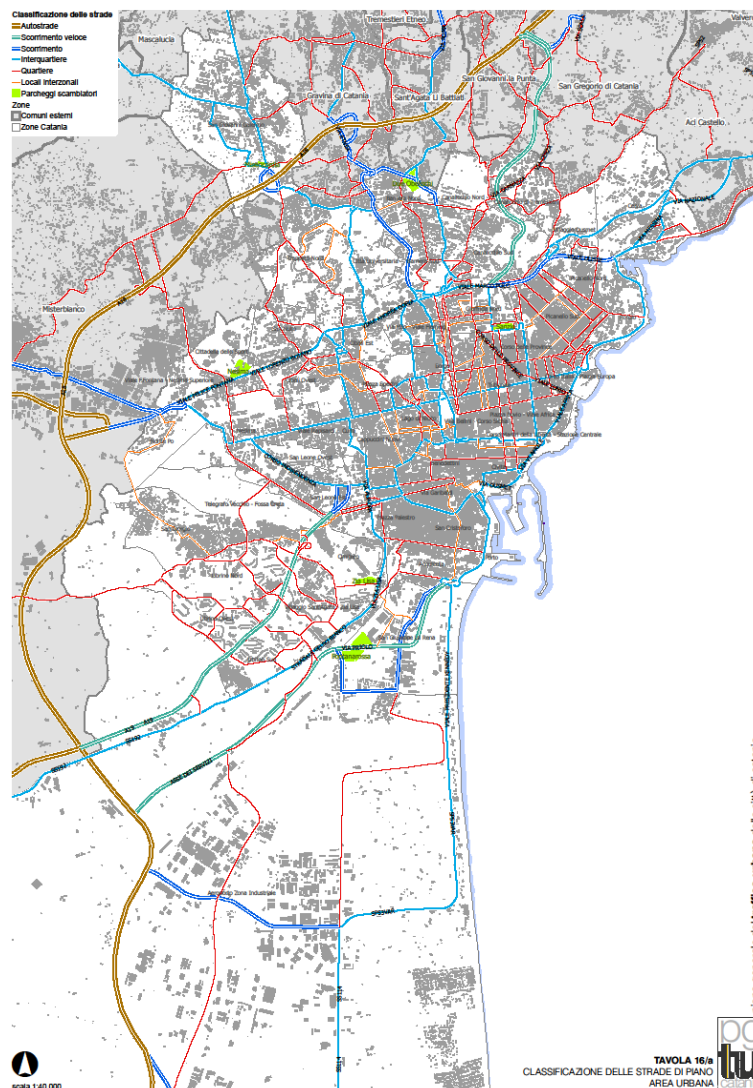


Figura 5.16 Delimitazione dell'area di studio

È possibile individuare i principali assi della rete stradale dell'area di studio, integrabili secondo alcuni importanti itinerari.

L'Autostrada A18 Messina-Catania è l'itinerario costiero da Messina a Catania; prosegue sulla Tangenziale nonché, radialmente, sul viale Mediterraneo per la penetrazione in città.

La Tangenziale aggira Catania lungo un arco a nord e ovest; collega la A18 all'A19 e alla S.S.114 sud per Siracusa; è un asse di distribuzione per destinazioni interne ed esterne al perimetro comunale.

Il Viale Mediterraneo è un asse radiale di penetrazione urbana che consente, in uscita da Catania, il collegamento tra il centro urbano e i comuni di S. Gregorio, S. G. La Punta e i paesi etnei; i raggi di curvatura e le pendenze ne fanno un'arteria assai pericolosa, nonostante la sezione di tipo autostradale.

La S.S.121 è un itinerario radiale che collega Catania a Misterbianco e Paternò; è accessibile dalla circonvallazione o dalla tangenziale.

La S.S. 114 costeggia integralmente la città, collegando Messina a Siracusa. È caratterizzata da elevati volumi di traffico e da una sezione variabile. In ambito urbano, si sviluppa da Ognina alla Plaia attraverso il lungomare, il viale Africa, le vie Dusmet, Colombo e Tempio.

Il Lungomare, arteria litoranea urbana, riceve il traffico veicolare pendolare proveniente da Cannizzaro ed Acicastello.

La circonvallazione è un'arteria, ormai urbana, a doppia carreggiata, e funge da asse di distribuzione oltre che di scavalco settentrionale della città densa; collega Ognina e la costiera (lungomare e SS.114) alla SS.121 ed al comune di Misterbianco.

L'Autostrada A19 Catania-Palermo è un itinerario radiale; prosegue sulla tangenziale, ovvero, per la penetrazione in città, sulla via Zia Lisa.

L'Asse dei servizi è un asse radiale di penetrazione, dalla tangenziale ovest al Faro Biscari e quindi all'area portuale, nonché utile al raggiungimento dell'aeroporto.

Gli archi viari, fin qui indicati (autostrade, strade statali, strade provinciali e raccordi comunali), rappresentano la viabilità principale che costituisce il sistema forte della rete stradale dell'area di studio. A questa viabilità primaria bisogna aggiungere quella minore, cioè la rete urbana costituita dalle strade di scorrimento, di interquartiere e di quartiere e dalle strade locali interzonali.

Pertanto, sulla base dell'assetto urbano e della distribuzione delle varie attività sul territorio, la rete stradale precedentemente individuata è stata assunta come grafo innervante il sistema essenzializzato dell'area di studio nel suo complesso (Figura 5.17).



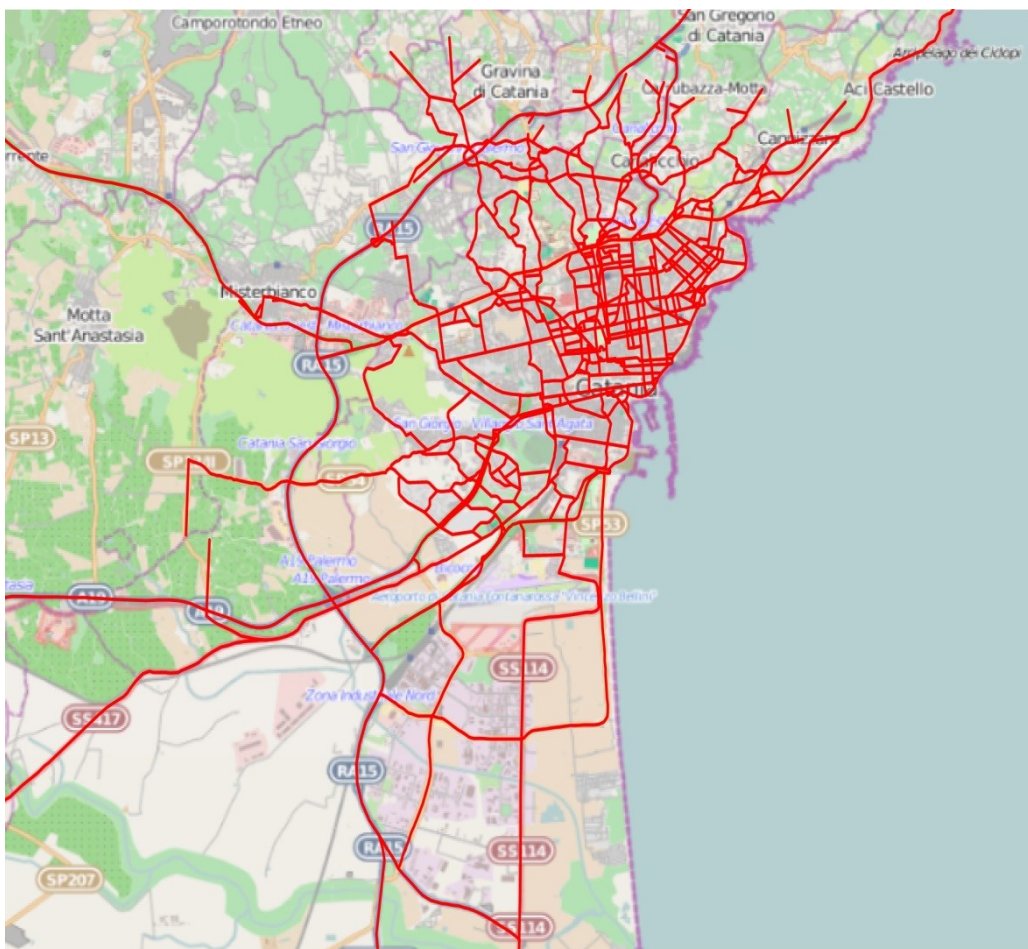


Figura 5.17 Grafo di rete dell'area di studio

## 5.4.2 Identificazione delle sezioni di posizionamento dei sensori

Nella scelta della collocazione dei sensori, si è tenuto conto della necessità di registrare i flussi in ingresso e in uscita dall'area urbana di Catania. Dunque, si è pervenuti alla definizione di un cordone immaginario attorno all'area di studio, lungo il quale sono state individuate le sezioni di posizionamento dei sensori.

La scelta delle sezioni è stata effettuata anche in relazione alle caratteristiche funzionali dei dispositivi di rilievo utilizzati. A tal riguardo, sono state scelte sezioni stradali:

- con pendenze non troppo elevate (inferiori a circa il 3%), in modo da avere il supporto del sensore fissato parallelamente alla sede stradale ed al flusso veicolare, evitando, così, una perdita di qualità dei valori acquisiti dal dispositivo;

- in corrispondenza di rettilinei, evitando tratti di strada curvi tali da impedire al flusso veicolare di scorrere parallelamente al dispositivo e comportare, così, errori nel posizionamento o nella classificazione veicolare;
- evitando la presenza di elementi di disturbo al regolare traffico (come ad esempio aree di sosta, incroci, fermate dei mezzi di trasporto, attraversamento pedonali, ecc.);
- caratterizzate da una regolarità del flusso veicolare, in modo da evitare decelerazioni o accelerazioni improvvise, o semplicemente la presenza di congestione ed eventuali incolonnamenti.

Inoltre, l'installazione di questi apparati necessita di almeno 1,5 metri di distanza dal flusso veicolare in transito e della possibilità di posizionamento del dispositivo stesso a 1 m di altezza dal piano stradale.

Con riferimento al caso studio della città di Catania, per il posizionamento dei 29 sensori Mobiltraf 300 sono state individuate 19 sezioni di seguito qui elencate:

- Sez.1 – Viale Presidente Kennedy;
- Sez. 2 – Asse dei Servizi-Strada Provinciale 701;
- Sez. 3 – Strada statale SS192;
- Sez. 4 – A19 Palermo-Catania;
- Sez. 5 – Via Palermo;
- Sez. 6 – Superstrada Catania-Paternò;
- Sez. 7 – Viale Lorenzo Bolano (Circonvallazione);
- Sez. 8 – Via Galermo;
- Sez. 9 – Via Santa Sofia;
- Sez. 10 – Via Passo Gravina;
- Sez. 11 – Via Leucatia;
- Sez. 12a – Viale Mediterraneo (S. Gregorio-Catania);
- Sez. 12b – Viale Mediterraneo (Catania- S. Gregorio);
- Sez. 13 – Via Nuovalucello;
- Sez. 14 – Viale Giuseppe Lainò-Viale Enzo Longo;
- Sez. 15 – Via Messina;
- Sez. 16 – Via Acicastello;
- Sez. 17 – Viale Africa;
- Sez. 18 – Viale A. Fleming;
- Sez. 19 – Viale Ruggero di Lauria.

La Figura 5.18 mostra la localizzazione spaziale di queste sezioni nell'area di studio.

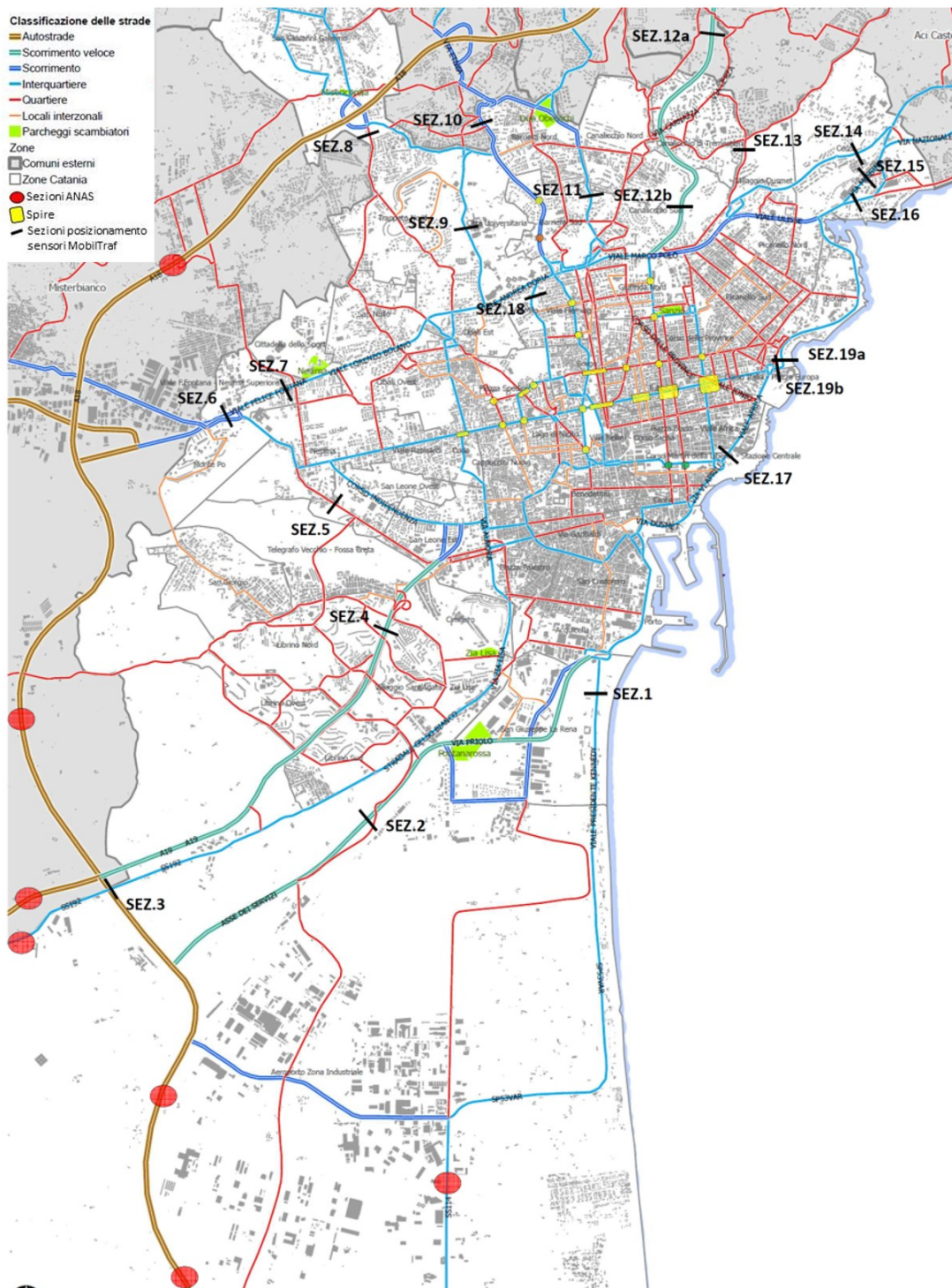


Figura 5.18 Localizzazione delle sezioni di posizionamento dei sensori

Per ciascuna di esse, sono state individuate le caratteristiche relative al tipo di carreggiata, al numero di corsie per senso di marcia, al tipo di illuminazione e alla presenza o meno di spartitraffico centrale (Tabella 5.1). Si è resa necessaria l'individuazione di queste

specifiche ai fini della determinazione del numero di sensori di rilievo da installare in ciascuna sezione e della valutazione della compatibilità tra le caratteristiche tecniche e funzionali delle apparecchiature e le sezioni individuate. In particolare, per garantire una misura corretta dei flussi di traffico, è stata prevista l'installazione di 2 sensori in corrispondenza delle sezioni con strada a carreggiate separate e con due corsie per senso di marcia. In questo caso, si è reso necessario installare, dunque, un sensore per ciascuna carreggiata e per ogni senso di marcia. Inoltre, attraverso l'individuazione della posizione dei pali della pubblica illuminazione, è stato possibile sapere con anticipo se fosse necessario realizzare un'installazione dei sensori di tipo centrale o laterale, e, ove non presenti, prevedere la realizzazione di un plinto di fondazione per la collocazione di un palo da utilizzare come supporto per l'installazione del sensore.

Tabella 5.1 Caratteristiche delle sezioni di posizionamento dei sensori

SEZIONE	LOCALIZZAZIONE	NUMERO SENSORI	CARREGGIATA	CORSIE PER SENSO DI MARCIA	ILLUMINAZIONE	SPARTITRAFFICO
1	Viale Presidente Kennedy	1	separate	1	centrale	si
2	Asse dei Servizi - Strada Provinciale 701	2	separate	2	laterale	si
3	SS192	1	unica	1	laterale	no
4	A19 Palermo - Catania	2	separate	2	assente	si
5	Via Palermo	1	unica	1	laterale	no
6	Superstrada Catania - Paternò	2	separate	2	centrale	si
7	Viale Lorenzo Bolano (Circonvallazione)	2	separate	2	centrale	si
8	Via Galermo	1	unica	1	laterale	no
9	Via Santa Sofia	1	unica	1	laterale	no
10	Via Passo Gravina	2	separate	2	laterale	si
11	Via Leucatia	1	unica	1	laterale	no
12a	Viale Mediterraneo	1	separate	2	laterale	si
12b	Viale Mediterraneo	1	separate	2	laterale	si
13	Via Nuovalucello	1	unica	1	laterale	no
14	Via Giuseppe Lainò - Viale Enzo Longo	2	separate	2	centrale	si
15	Via Messina - Viale Ulisse	1	unica	2	laterale	no
16	Via Acicastello	1	unica	1	laterale	no
17	Viale Africa - SS114	2	separate	2	centrale	si
18	Via A. Fleming	2	separate	2	centrale	si
19	Viale Ruggero di Lauria	2	unica	2	assente/laterale	no
<b>TOT.SENSORI</b>		<b>29</b>				

L'ipotesi progettuale di posizionamento dei sensori elaborata consente, con la configurazione illustrata, di massimizzare il flusso registrato in ingresso e in uscita nell'area di studio e, al contempo, di minimizzare il numero di sensori necessari per la rilevazione (Mirchandani e Gentile, 2012).

### 5.4.3 Installazione e configurazione dei sensori MT300

In accordo con la precedente ipotesi progettuale di posizionamento, si è proceduto all'installazione e configurazione in loco dei sensori di rilievo. Tali operazioni sono state eseguite, sotto la mia personale e costante supervisione, da tecnici della ditta fornitrice, e sono state e lo sono ancora ad oggi, oggetto di numerosi ed impegnativi interventi tecnici di aggiornamento e di manutenzione.

La tecnologia radar dei sensori Mobiltraf 300, non essendo intrusiva offre evidenti vantaggi di facilità di posa in opera e di sicurezza. Infatti, per effettuare queste operazioni non si necessita la chiusura della strada e, inoltre, per installazioni mobili è possibile sfruttare come supporto strutture esistenti, come ad esempio pali della segnaletica, pali dell'illuminazione oppure guard-rail.

Per tutte le stazioni di rilevamento traffico, si è cercata, in generale, una soluzione che potesse contenere al massimo i disagi provocati in fase di installazione (scavi, allacciamenti, ecc.), preferendo, inoltre, l'utilizzo di una alimentazione mista a batteria e con pannelli fotovoltaici.

La tipologia di installazione, è stata eseguita in funzione delle caratteristiche relative al tipo di carreggiata e al numero di corsie per senso di marcia, al tipo di illuminazione e alla presenza o meno di spartitraffico centrale.

Nel caso specifico di Catania, per quasi la totalità delle installazioni, sono stati utilizzati come supporto i pali dell'illuminazione pubblica, ancorando su di essi anche un piccolo pannello fotovoltaico ad altezza opportuna dal suolo, per garantire l'alimentazione continua del dispositivo (Figura 5.19).

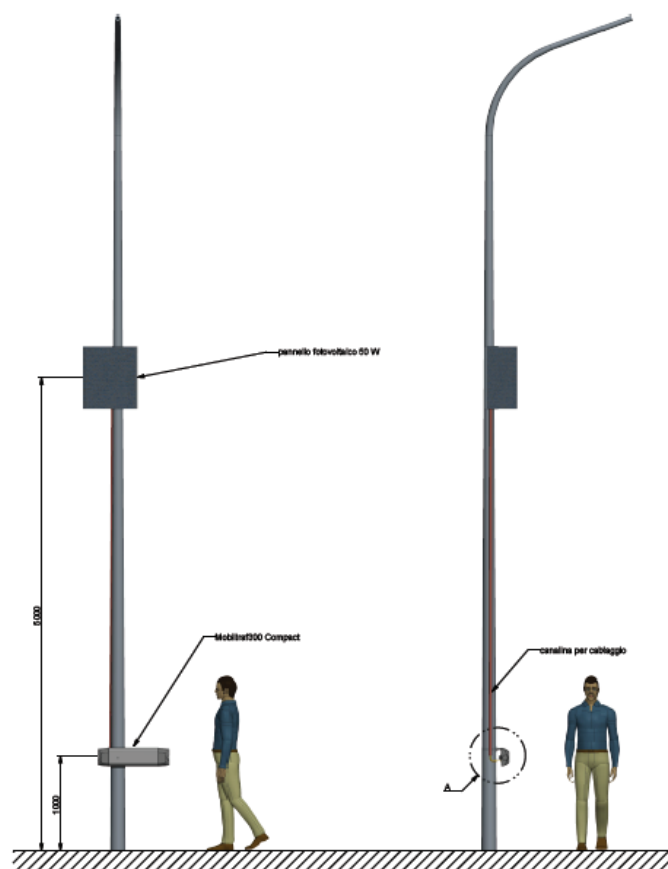


Figura 5.19 Schema tecnico di installazione su palo dell'illuminazione

Tuttavia, nel caso di una delle sezioni individuate, precisamente in corrispondenza della sezione 15 in Via Messina, non essendo presente un palo dell'illuminazione idoneo all'istallazione del sensore, si è resa necessaria la realizzazione di una struttura costituita da un plinto di fondazione e un palo che funge da supporto sia al rilevatore, sia al pannello fotovoltaico, secondo lo schema illustrato in Figura 5.20.

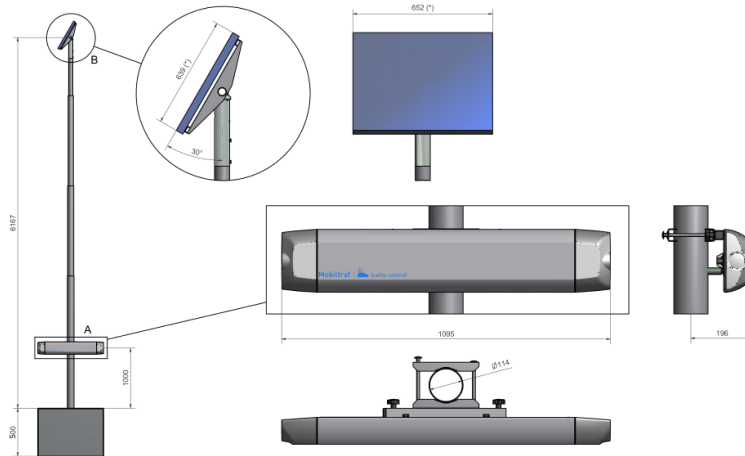


Figura 5.20 Plinto di fondazione e palo di supporto al rilevatore e al pannello

La Figura 5.21 mostra una delle postazioni di monitoraggio installate sull'infrastruttura stradale, caratterizzata da due corsie per senso di marcia. In questo caso, per garantire una misura corretta dei flussi di traffico, è stata prevista l'installazione di 2 sensori, uno per ciascun senso di marcia, posti ad 1 metro di altezza dal piano stradale e dei relativi pannelli fotovoltaici.



Figura 5.21 Postazione di monitoraggio realizzata sul campo – sezione 18

Inoltre, in considerazione del valore delle suddette attrezzature, e in particolare delle caratteristiche di amovibilità delle stesse, è stato necessario eseguire dei lavori di rinforzo attraverso l'impiego di tubolari in acciaio, in modo da realizzare una struttura anti-cesura per ciascuno dei sensori di rilievo di traffico installati (Figura 5.22).



Figura 5.22 Struttura anti-cesura

Dunque, questi sensori, montati a lato strada ad idonea altezza e distanza dalla carreggiata, sono in grado di misurare i movimenti dei veicoli in transito nella direzione di marcia selezionata, provvedendo alla classificazione dimensionale del mezzo, alla determinazione della sua velocità di passaggio e del distacco temporale dal veicolo precedente e seguente.

Questo sistema così fatto consente, pertanto, una registrazione dei dati in maniera continua, lungo le 24 ore. Inoltre, tale tipo di sensore consente di rilevare, oltre al conteggio dei veicoli attraversanti il suo campo di azione ed alla misura diretta delle loro velocità, anche i veicoli fermi, per cui, essendo collegato ad una centrale di controllo remota potrebbe essere in grado di segnalare in tempo reale eventuali incidenti.

Si riportano in allegato le altre sezioni di rilievo messe in opera sul campo.

## **5.5 Implementazione e calibrazione del sistema centrale**

Avviata la procedura di installazione delle postazioni di rilievo, si è proceduto allo svolgimento delle attività di implementazione e successiva calibrazione del sistema centrale.

Pertanto, parallelamente all'installazione dei dispositivi di rilievo sul campo, è stata avviata l'installazione della centrale di gestione e controllo presso il Laboratorio dei Trasporti del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Architettura dell'Università degli Studi di Catania, insieme alla configurazione dei PMV e delle relative interfacce di MMobility ed Optima.

### 5.5.1 Pre-calibrazione del modello di trasporto (off-line)

La fase di costruzione del modello è il primo passo da effettuare per lo svolgimento delle analisi successive. Pertanto, trattandosi di un sistema di gestione del traffico ed infomobilità si è reso necessario modellizzare da un lato l'offerta di trasporto, rappresentata dall'infrastruttura o rete stradale, e dall'altro la domanda di trasporto, cioè gli utenti, attraverso differenti segmenti di domanda.

Il software utilizzato per implementare il modello di trasporto off-line è il VISUM. La Figura 5.23 descrive questo modello, che è composto dai dati relativi all'offerta di trasporto e da quelli relativi alla domanda di spostamento.

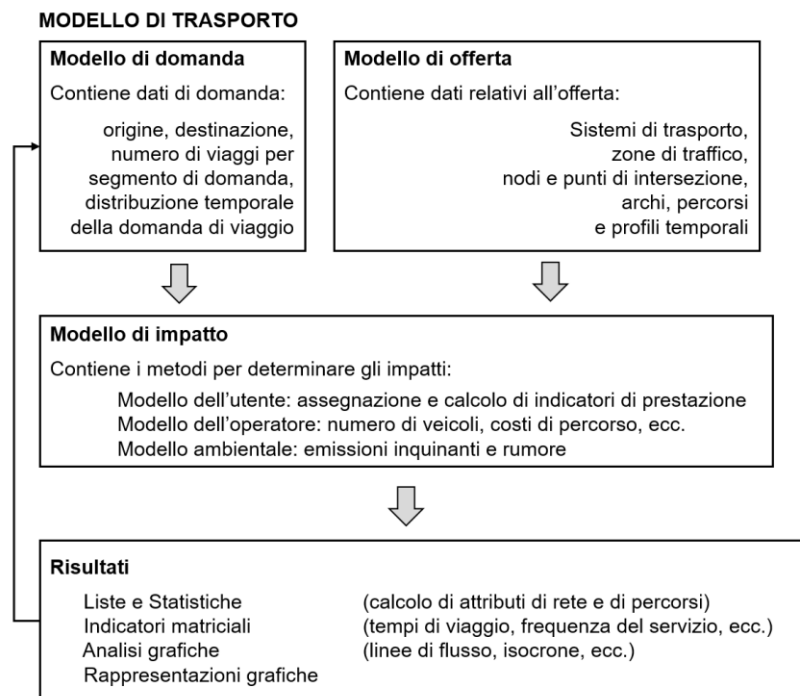


Figura 5.23 Descrizione del modello di VISUM

Per il caso studio di Catania, questa operazione è stata eseguita a partire dalla matrice di domanda O/D e dal grafo utilizzati per la redazione del PGTU di Catania. Tale sistema è stato progettato per un'analisi multimodale, integrando, dunque, in un unico modello di rete tutti i principali sistemi di trasporto (auto, mezzi pesanti, autobus, mezzi di emergenza, ecc.).

Di seguito sono illustrate le due modellazioni eseguite.



### 5.5.1.1 Modellazione dell'offerta di trasporto

L'offerta è rappresentata da un modello di rete che deve descrivere la struttura spaziale e temporale dell'offerta di trasporto. Per questa ragione, il modello di rete è costituito da "oggetti" che contengono dati riguardanti gli archi della rete, i nodi e le zone di traffico.

La costruzione del modello di offerta relativo alla rete di trasporto dell'area di studio è stata realizzata, come detto precedentemente, attraverso l'ausilio del software VISUM. Sfruttando le funzionalità di questo programma, la viabilità principale dell'area urbana di Catania e dell'area a est dell'autostrada A18, è stata schematizzata tramite un grafo di rete orientato composto da elementi puntuali (nodi) e da elementi lineari (archi), definendo degli attributi specifici per ciascuno di questi elementi (Figura 5.24). Questo grafo trasportistico è utilizzato come rete di assegnazione di Optima, sulla quale vengono effettuate le simulazioni per il calcolo delle stime e previsioni di traffico in tempo reale.

È stata utilizzata, invece, una base cartografica più dettagliata che include un numero maggiore di infrastrutture stradali dell'area di studio, in modo da essere più adatta anche alla funzionalità di ricerca del percorso, che sarà trattata in seguito nei prossimi paragrafi.

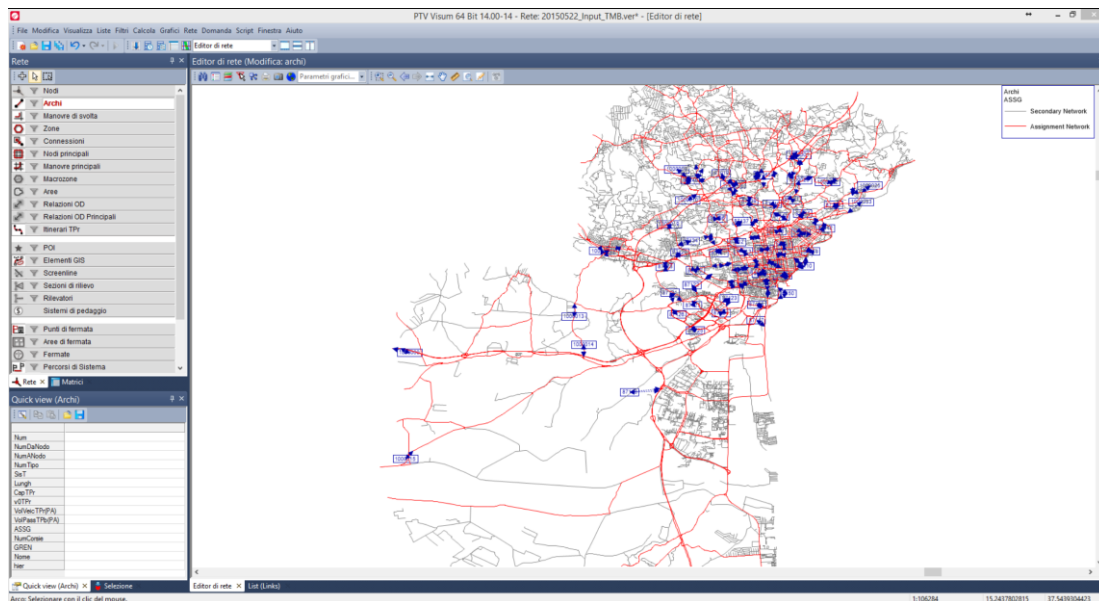


Figura 5.24 Modello di rete della città di Catania

L'implementazione del modello di offerta di trasporto privato è avvenuta secondo le fasi e i criteri di seguito descritti.

Le fonti informative iniziali per la costruzione del grafo sono state acquisite da quello utilizzato per la realizzazione del Piano Generale del Traffico Urbano – PGTU (Figura 5.25), e

successivamente, nel database originario sono state implementate le nuove informazioni riguardanti le caratteristiche fisiche e funzionali della rete.

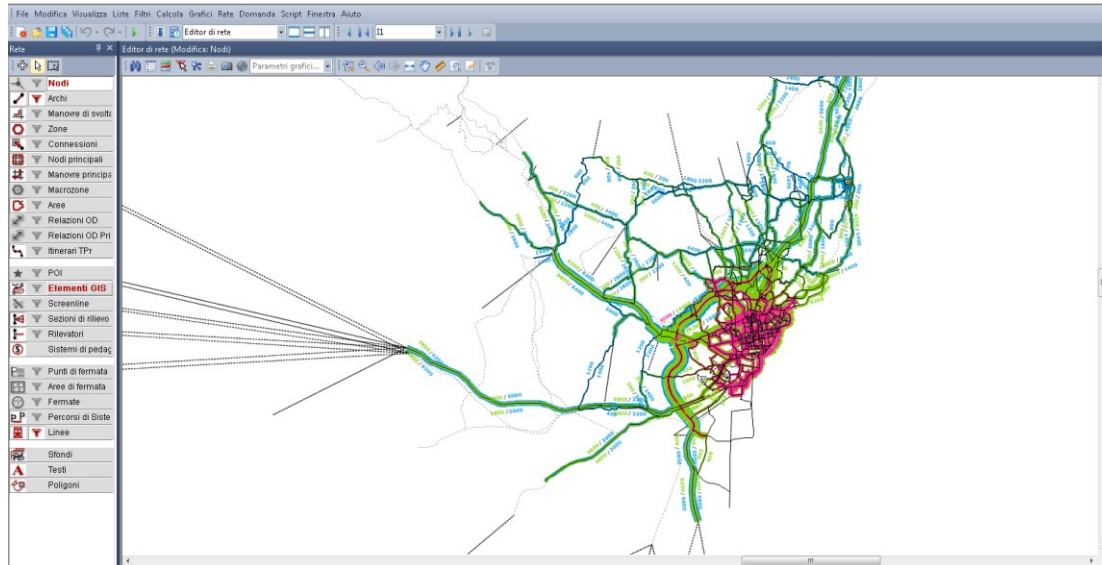


Figura 5.25 Grafo utilizzato per il Piano Generale del Traffico Urbano – PGTU

Fondamentalmente il modello realizzato comprende i seguenti oggetti di rete:

- **Archi:** sono elementi di collegamento tra due nodi, che descrivono la rete in termini di velocità e capacità per il trasporto privato e tempi di viaggio per il trasporto pubblico. Ciascun arco presenta una particolare direzione, pertanto l'arco nella direzione opposta costituisce un differente oggetto della rete. In questo caso sono presenti 17528 archi (Figura 5.26);

Lista (Archi)										
Conteggio:	17528	Num	NumDaNodo	NumANodo	NumTipo	SisT	Lungh	NumCorsie	CapTPri	vOTPr
1	64223141	547888006	557641602	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.090km	2	3600	90km/h	
2	64223141	557641602	547888006	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.090km	2	3600	90km/h	
3	64223145	547888008	557641599	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.065km	2	3600	90km/h	
4	64223145	557641599	547888008	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.065km	2	3600	90km/h	
5	64223146	547888008	557641606	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.062km	2	3600	90km/h	

Figura 5.26 Elenco (estratto) degli archi costituenti il grafo di Catania

- **Nodi:** elementi puntiformi che rappresentano intersezioni o altre discontinuità della rete viaria (per esempio una variazione di sezione dell'infrastruttura). In questo caso si hanno 7871 nodi (Figura 5.27);

Conteggio: 7871	Num	Cod	Nome	NumTipo	CoordX	CoordY
1	547888006			0	14.9957400000	37.5235600000
2	547888008			0	14.9968600000	37.5215800000
3	547890741			0	15.0294600000	37.4592200000
4	547890742			0	15.0905900000	37.5399900000
5	547890745			0	15.0248200000	37.4639300000
6	547890746			0	15.0248700000	37.4636600000
7	547890758			0	15.0291600000	37.4596200000
8	547890762			0	15.0589200000	37.5452900000
9	547890763			0	15.0589700000	37.5453800000
10	547891907			0	14.9354800000	37.4639400000

Figura 5.27 Elenco (estratto) dei nodi del grafo di Catania

- *Svolte e svolte principali*: indicano le manovre di svolta consentite in corrispondenza di ciascun nodo e le penalità di svolta presenti;
- *Zone*: si tratta di oggetti che descrivono le aree con particolari usi del territorio e la loro localizzazione all'interno della rete (aree residenziali, aree commerciali, scuole, ecc.). Esse rappresentano le origini e le destinazioni della domanda di spostamento. Nel caso del grafo di Catania sono presenti 89 zone (Figura 5.28);

Conteggio: 89	Num	Cod	Nome
1	87019		Gravina Di Catania
2	87045		San'Agata Li Battiati
3	87101		Via Garibaldi
4	87102		Benedettini
5	87103		Civita
6	87104		San Cristoforo
7	87105		Acquicella
8	87106		Piazza Palestro
9	87107		Cappuccini Nuovi
10	87108		Lago di Nicito
11	87109		Villa Bellini - Corso Sicilia
12	87110		Corso Martiri della Libertà - Stazione Centrale
13	87111		Cibali Ovest
14	87112		Cibali Est
15	87113		Piazza Spedini
16	87114		Via Milo - Viale Fleming
17	87115		Borgo
18	87116		Giuffrida Nord
19	87117		Corso delle Province
20	87118		Tribunale
21	87119		Corso Italia - Piazza Europa
22	87120		Piazza Bovio - Viale Africa
23	87121		San Giorgio

Figura 5.28 Elenco (estratto) delle zone del grafo di Catania

- *Connettori*: collegano le zone con gli archi della rete. Essi permettono l'accesso e l'uscita da ciascuna zona e rappresentano, dunque, la distanza che deve essere coperta tra il centro di gravità di una zona e i nodi della rete di trasporto. In questo caso sono stati inseriti 304 connettori (Figura 5.29).

Lista (Connessioni)						
Conteggio: 304	NumZona	NumNodo	Direzione	NumTipo	SisT	Lungh.
1	87019	1043966546	0	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.401km
2	87019	1043966546	D	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.401km
3	87045	1043966547	0	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.663km
4	87045	1043966547	D	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.663km
5	87101	1043966548	0	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.155km
6	87101	1043966548	D	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.155km
7	87101	1043966549	0	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.178km
8	87101	1043966549	D	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.178km
9	87102	1043966550	0	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.094km
10	87102	1043966550	D	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.094km
11	87102	1043966551	0	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.125km
12	87102	1043966551	D	0	car,carpooling,car_ztl,emergency_vehicle,heavy_truck,light_truck,motorcycle,pedestrian	0.125km

Figura 5.29 Elenco (estratto) dei connettori del grafo di Catania

L'insieme di tutti questi elementi di rete descritti precedentemente costituisce, dunque, il grafo trasportistico riferito all'area urbana della città di Catania. In particolare, si hanno due distinti layer di rete: una Secondary Network (in arancione) che rappresenta l'insieme degli archi che costituiscono la rete di trasporto dell'area urbana di Catania, ed una Assignment Network (in blu), che in termini di dettaglio rappresenta un sottoinsieme della precedente rete, nella quale avviene, invece, l'assegnazione della domanda (Figura 5.30).

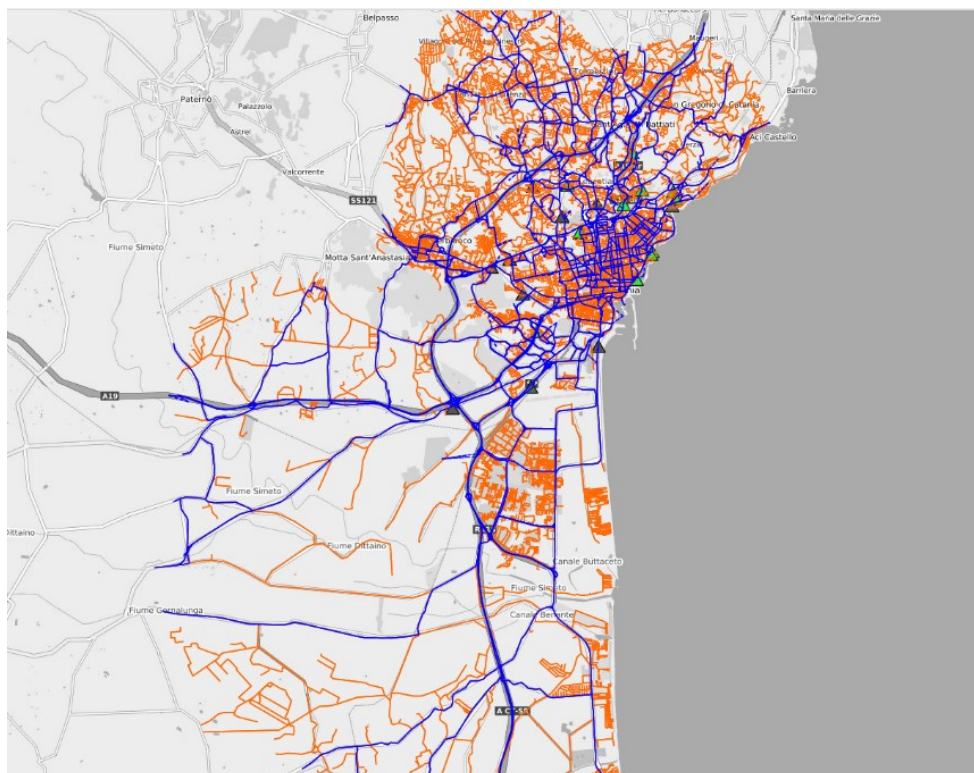


Figura 5.30 Secondary Network e Assignment Network del grafo di Catania

Ogni oggetto della rete viene descritto attraverso una serie di attributi, che possono essere:

- di input (ad esempio il numero identificativo dell'arco, o la sua lunghezza);

- calcolati (ad esempio il numero di veicoli assegnati all'arco).

In generale, la definizione e configurazione di questi attributi è stata realizzata per tutti gli elementi del grafo precedentemente descritto.

Con riferimento a ciascun arco presente nel grafo, sono stati definiti nel modello VISUM i seguenti attributi:

- COUNT: numero progressivo indicante, alla fine, il numero totale di archi presenti;
- No: codice identificativo dell'arco;
- FROMNODE\_No e TONODE\_No: rispettivamente numero del nodo di origine e numero del nodo di destinazione, utili per distinguere il verso di percorrenza dell'arco considerato;
- LENGHT: lunghezza dell'arco espressa in metri;
- NAME: denominazione della strada a cui appartiene l'arco considerato;
- T\_SYS\_SET (Transport System Set): indica i sistemi di trasporto abilitati a percorrere l'arco (moto, auto, veicoli commerciali leggeri e pesanti, mezzi di soccorso, car pooling, ecc.)
- ASSG (Assignment graph): è uguale ad 1 se l'arco è utilizzato nel modello di assegnazione, viceversa assume valore nullo. Nel caso di Catania, tale valore è stato settato pari all'unità per gli archi costituenti il grafo del PGTU;
- NUMLANES: numero minimo di corsie dell'arco;
- Vo\_PRT: velocità massima di percorrenza dell'arco, senza tener conto di eventuali perditempo;
- CAP\_PRT: capacità in ingresso dell'arco, influenzata dal numero di corsie.

Per quanto riguarda la capacità dell'arco, si ha un altro importante attributo definito come OUT\_CAP\_PRT, che rappresenta la capacità in uscita dell'arco. Segnando l'opzione USE\_OUT\_CAP\_PRT, è possibile utilizzare questo valore di capacità in uscita, altrimenti sarà automaticamente posta uguale a quella in ingresso. Questa capacità risulta essere influenzata da un parametro, detto GREN, che rappresenta la % di verde. Esso è variabile tra 0 e 1 e, a seconda del valore assunto, la capacità in uscita dell'arco assumerà un valore pari a al prodotto tra la capacità stessa e il GREN. Dunque, se:

- GREN=1, vuol dire che non c'è il semaforo alla fine dell'arco e il varco è sempre aperto. In questo caso la capacità in ingresso dell'arco coinciderà con quella in uscita;
- GREN= 0,5 è come se ci fosse uno stop; dunque la capacità in uscita dall'arco di riduce del 50%.
- GREN=0 è come se ci fosse semaforo e il varco a valle è chiuso. La capacità in uscita sarà perciò nulla.

Infine, attraverso la funzione *Edit Graphic Parameters*, è stato possibile definire dei tematismi per ciascuno di questi attributi. La Figura 5.31 mostra, ad esempio, come questa

funzione sia stata utilizzata per associare un determinato colore a ciascun arco del grafo, sulla base del numero di corsie che costituiscono l'arco stesso.

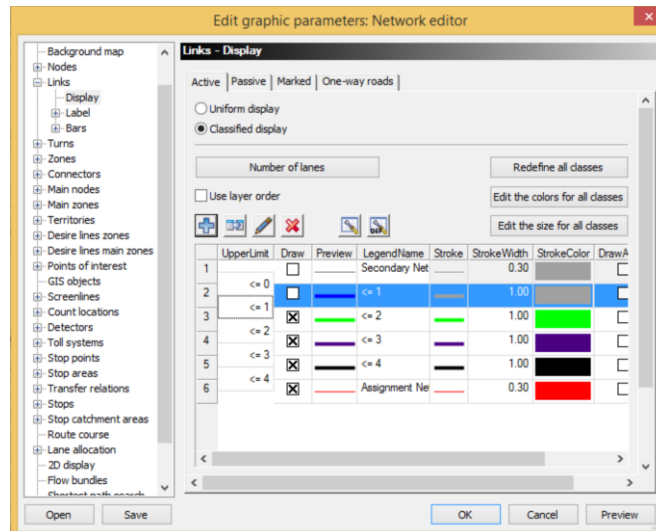


Figura 5.31 Finestra di dialogo della funzione *Edit Graphic Parameters*

Questo permette di ottenere, in generale, delle mappe cromatiche di immediata lettura ed interpretazione, come quella in Figura 5.32.

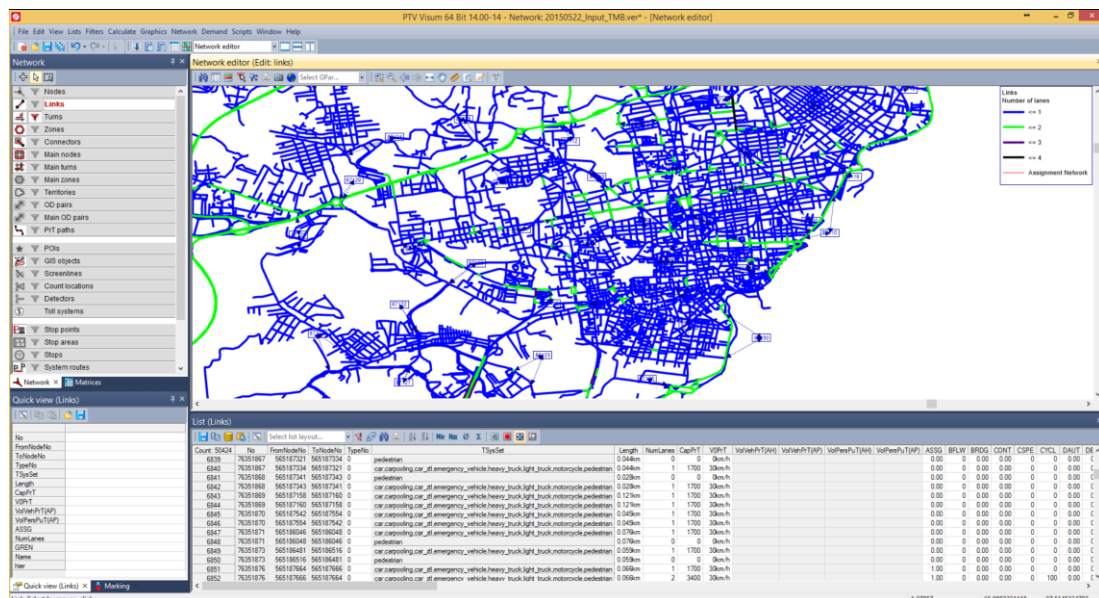


Figura 5.32 Mappa cromatica in funzione del numero di corsie per ciascun arco

### 5.5.1.2 Ricostruzione della domanda di trasporto privato

La domanda di spostamento nasce da una serie di attività (casa, lavoro, studio, svago, ecc.) che non possono essere svolte nel luogo in cui ci si trova, e dunque, richiedono uno spostamento. Per rappresentare l'insieme di tali spostamenti ci si avvale di matrici Origine/Destinazione, che si riferiscono ad un intervallo di tempo preciso, che coincide a volte con il periodo di analisi. Ciascun elemento di questa matrice O/D rappresenta il numero di viaggi tra una determinata origine ed una determinata destinazione e possono comprendere sia l'insieme delle varie modalità di spostamento, oppure essere suddivisi per differenti modalità.

Nel caso studio analizzato, la ricostruzione della domanda di trasporto è avvenuta attraverso un modello che comprende e descrive i flussi dei veicoli leggeri e pesanti. In particolare, sono stati generati 6 *segmenti di domanda*, tre tipo 1 validi per i giorni feriali e tre di tipo 2 per i giorni festivi (Figura 5.33):

- LEGGERI\_DTYP1\_BKO mezzi leggeri feriale andata;
- LEGGERI\_DTYP1\_BK1 mezzi leggeri feriale ritorno;
- LEGGERI\_DTYP2\_BKO mezzi leggeri festivo andata;
- LEGGERI\_DTYP2\_BK1 mezzi leggeri festivo ritorno;
- PESANTI\_DTYP1 mezzi pesanti feriale;
- PESANTI\_DTYP2 mezzi pesanti festivo.

Numero	Nome	Tipo	Da	A
1	Default	1 Distribuzione temporale come percentuale	00:00:00	23:59:59
10	LEGGERI_DTYP1_BKO	1 Distribuzione temporale come percentuale	00:00:00	14:00:00
20	LEGGERI_DTYP1_BK1	1 Distribuzione temporale come percentuale	14:00:00	23:59:59
30	PESANTI_DTYP1	1 Distribuzione temporale come percentuale	00:00:00	23:59:59
40	LEGGERI_DTYP2_BKO	1 Distribuzione temporale come percentuale	00:00:00	14:00:00
50	LEGGERI_DTYP2_BK1	1 Distribuzione temporale come percentuale	14:00:00	23:59:59
60	PESANTI_DTYP2	1 Distribuzione temporale come percentuale	00:00:00	23:59:59

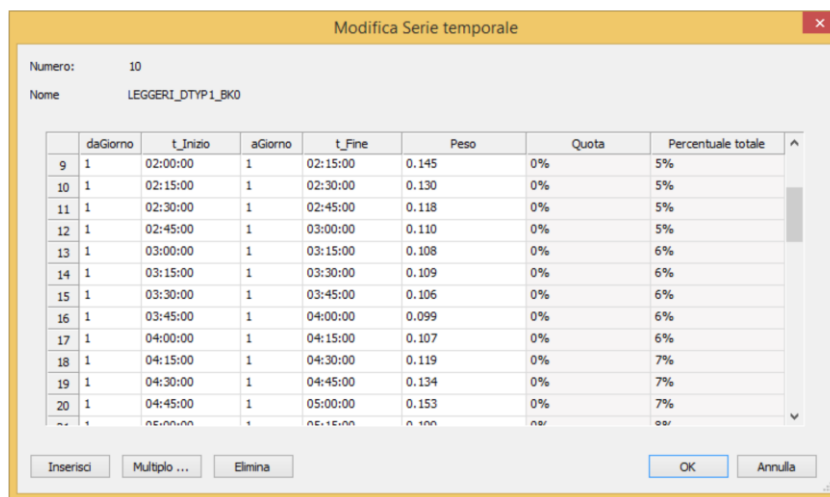
Figura 5.33 Segmenti di domanda del modello di Catania

Questa particolareggiatura è stata eseguita per tenere conto della variabilità della domanda sia intragiornaliera che intergiornaliera e della complessità di spostamento associata alle diverse categorie veicolari. Tuttavia, per i mezzi pesanti non è stata effettuata la

distinzione tra viaggi di andata e di ritorno perché sono caratterizzati da spostamenti più semplici rispetto a quelli dei mezzi leggeri.

Inoltre, nel modello di traffico precedente non era presente la distinzione tra giorni feriali e festivi, ma vi era un unico giorno feriale. Dunque, inizialmente è stata usata questa matrice feriale per calibrare la nuova matrice di tipo 1; successivamente è stata calibrata la matrice di tipo 2.

Infine, per ciascun segmento di domanda è stata determinata anche la distribuzione nella giornata attraverso la funzione *Modifica Serie temporale*: tali profili giornalieri sono stati fissati indicando i valori percentuali di flusso rispetto all'intera giornata ad intervalli pari al quarto d'ora, come si può vedere dalla Figura 5.34 nelle colonne di T\_Inizio e T\_Fine.



	daGiorno	t_Inizio	aGiorno	t_Fine	Peso	Quota	Percentuale totale
9	1	02:00:00	1	02:15:00	0.145	0%	5%
10	1	02:15:00	1	02:30:00	0.130	0%	5%
11	1	02:30:00	1	02:45:00	0.118	0%	5%
12	1	02:45:00	1	03:00:00	0.110	0%	5%
13	1	03:00:00	1	03:15:00	0.108	0%	6%
14	1	03:15:00	1	03:30:00	0.109	0%	6%
15	1	03:30:00	1	03:45:00	0.106	0%	6%
16	1	03:45:00	1	04:00:00	0.099	0%	6%
17	1	04:00:00	1	04:15:00	0.107	0%	6%
18	1	04:15:00	1	04:30:00	0.119	0%	7%
19	1	04:30:00	1	04:45:00	0.134	0%	7%
20	1	04:45:00	1	05:00:00	0.153	0%	7%

Figura 5.34 Finestra di dialogo della funzione *Modifica Serie temporale*

A partire dai segmenti di domanda e dalla loro distribuzione temporale, si è giunti alla formulazione del contenuto delle matrici O/D utilizzate dal modello di simulazione per la procedura di assegnazione dinamica.

## 5.5.2 Calibrazione del sistema

La messa a punto del modello ha comportato l'esecuzione di una serie di indagini sui flussi di traffico veicolare che hanno permesso di raccogliere dati indispensabili per la calibrazione e la validazione del modello.

Di seguito sono descritte le tre fasi affrontate per la procedura di calibrazione.



### 5.5.2.1 Raccolta dei dati in campo e calibrazione del modello Optima

La matrice è stata oggetto di correzione con il metodo “TFlowfuzzy”, utilizzando i dati elaborati a partire dai rilievi di traffico effettuati tramite i sensori MobilTraf300, opportunamente aggregati e mediati.

Il metodo di tipo “fuzzy”, a partire dalla matrice di partenza e dall’insieme dei dati rilevati, imponendo l’uguaglianza dei flussi stimati e rilevati, fornisce una matrice di domanda aggiornata. Tale matrice viene calcolata, mediante fattori di moltiplicazione per gli elementi della matrice iniziale attraverso una procedura di bilanciamento: la comparazione dei volumi calcolati con i dati rilevati, fa sì che le sezioni di rilievo forniscano informazioni sui “fattori di correzione” da applicare. Ovviamente ad una relazione O/D possono riferirsi più sezioni di rilievo e quindi esiste la possibilità che questa venga influenzata da più fattori di correzione.

Per l’aggiornamento della matrice è stato eseguito un processo iterativo costituito da 5 passaggi (Figura 29):

1. inizio dell’assegnazione;
2. assegnazione
3. correzione della matrice di domanda (TFlowFuzzy)
4. vai nuovamente all’operazione 2
5. assegnazione.

Ai fini della calibrazione sono state utilizzate le matrici originali del modello combinate con flussi noti sugli archi, considerando un periodo di rilievo di circa due mesi. L’assegnazione di questa matrice mostra una correlazione lineare tra i dati rilevati e quelli stimati dal modello pari a 0,94 (Figura 5.35).

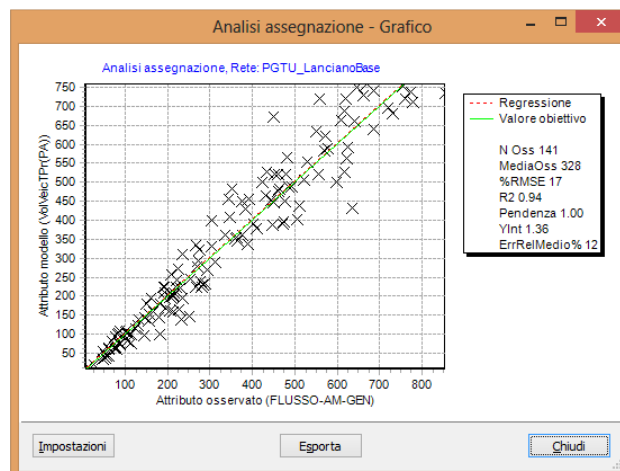


Figura 5.35 Correlazione lineare tra flussi rilevati e stimati dopo la TFlowfuzzy

### 5.5.2.2 Fase di test e validazione del modello Optima

Per simulare il modello ed osservare i risultati della calibrazione è stato utilizzato il *Transportation Model Builder – TBM*. Esso permette il passaggio dalla versione di VISUM off-line alla versione on-line OPTIMA. È possibile scegliere due differenti steps (Figura 5.36):

- STEP 3 *Simulation Model*. È uno step più semplificato poiché crea un nuovo modello per Optima e lo simula;
- STEP 4 *Export to Optima DB*, che invece trasferisce i dati da VISUM al database di Optima. Questo permette di creare un nuovo DB per un nuovo scenario.

Per osservare visivamente i risultati si utilizza *Transportation Data Exchange Viewer – TDE* (Figura 5.37).

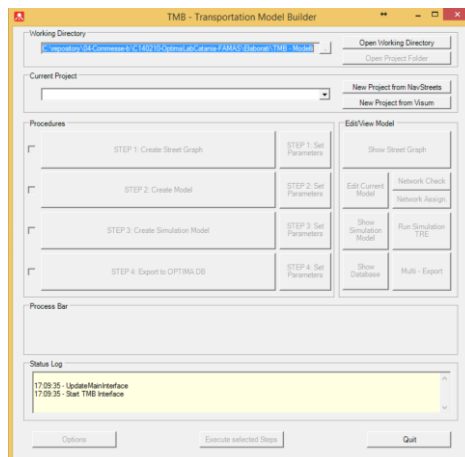


Figura 5.36 Steps Transportation Model Building – TBM



Figura 5.37 Transportation Data Exchange Viewer – TDE

### 5.5.2.3 Fase di test e validazione del sincronismo tra MMobility e Optima

Il flow chart rappresentato in Figura 5.38 mostra l'andamento dei valori di:

- *Entry Flow* (in rosa): flusso simulato dal modello Optima;
- *Measured Flow* (in blu): flusso rilevato dal sensore;
- *Exit Flow* (in fucsia): flusso corretto sulla base dell'input ricevuto dal sensore.

Dunque, in corrispondenza delle sezioni subito a valle di una count location, viene operata una correzione del flusso. Per tale motivo, Entry Flow ed Exit Flow non coincidono. Invece, nelle sezioni non dotate di rilevatore o dove sono presenti dei guasti, si ha un Entry Flow è pressoché uguale all'Exit flow.

Minimizzare tali correzioni significa avere un buon modello, in grado di simulare flussi di traffico molto simili a quelli reali. A tal proposito, la bontà del modello potrebbe essere valutata attraverso degli indicatori KPI che danno una misura dell'entità della correzione effettuata. Tanto minore è tale correzione, migliore sarà calibrato il modello.

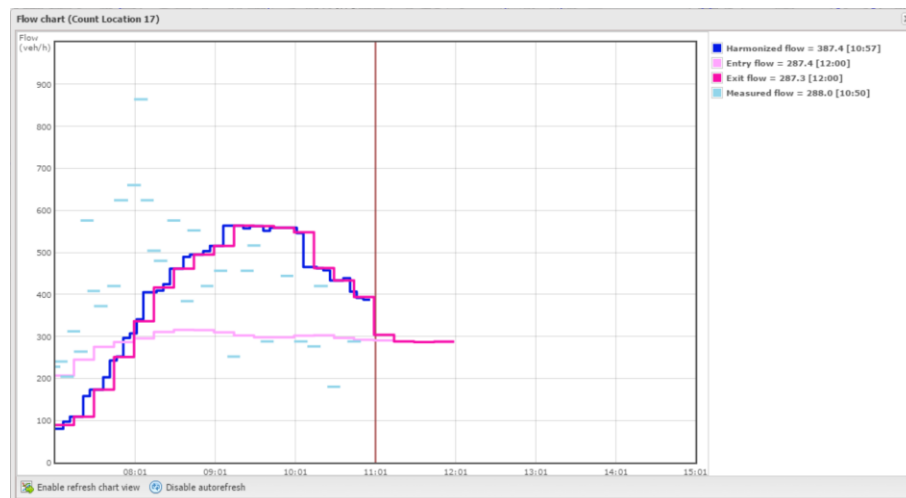


Figura 5.38 Flow chart count location

### 5.5.3 Integrazione dati FCD

Al fine di migliorare le prestazioni complessive del sistema di monitoraggio, stima e previsione del traffico, si è ritenuto necessario procedere all'acquisto di una Banca Dati FCD, riguardanti il territorio catanese.

Questo servizio è costituito da una fornitura annuale di un flusso continuo di dati rilevati da sensori mobili HD FCD (High Definition Floating Car Data) circolanti nell'area del

territorio metropolitano di Catania. Ciò al fine conoscere, in real-time, le reali velocità di percorrenza sulla rete e, quindi, il grado di congestione stradale.

Il sistema centrale e i veicoli hanno lo stesso grafo della rete stradale. In tal modo, i sensori HD FCD consentono di rilevare in maniera precisa i parametri relativi al moto estendendoli a tutti i veicoli che si muovono nell'area da monitorare.

La possibilità di poter calcolare la velocità sugli archi del grafo a partire da questi dati FCD, resi disponibili dai dispositivi GPS a bordo dei veicoli, permette di poter alimentare il cerca-percorso Hyperpath (di cui si parlerà successivamente) con dati di velocità sugli archi sempre aggiornati e di fornire, così, 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. Tuttavia, 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.

È possibile affermare che l'adozione di questi dati rappresenta una via efficace per raggiungere stime e previsioni accurate dei tempi di percorrenza della rete stradale analizzata, consentendo inoltre di aggiornare la conoscenza sulle condizioni di traffico in tempo reale.

## **5.6 Supervisione del traffico e informazione dinamica**

Una grande opportunità che si ha con l'utilizzo dei sistemi di trasporto intelligente è quella di poter ottenere informazioni in tempo reale. Prima di tale innovazione si disponeva solamente di informazioni di tipo statico, cioè indipendenti dalle reali condizioni della rete o, al più, aggiornate con una frequenza molto bassa. Queste ultime sono, ad esempio, quelle relative alle operazioni pianificate di costruzione e manutenzione di un ramo stradale, ai costi dei pedaggi e alle modalità di pagamento, ai prezzi dei biglietti, ecc.

Le informazioni real-time, invece, cambiano con frequenza elevata e, proprio perché relative alle effettive condizioni presenti nella rete, risultano molto utili sia agli operatori, per un'efficiente supervisione e gestione del traffico, sia agli utenti che possono acquisirle per conoscere le condizioni della mobilità ed eventualmente pianificare i propri spostamenti.

Come già descritto in precedenza, OPTIMA è costituito essenzialmente da 3 componenti:

1. il database, nel quale vengono importati e conservati i dati statici e dinamici raccolti, utilizzati e prodotti dal modello, nonché le elaborazioni relative alle misure e ai siti di conteggio gestiti dal sistema;

2. l'application server, che ha il compito di effettuare le elaborazioni richieste sui dati da fornire al resto del sistema;
3. l'interfaccia amministratore *Traffic Supervisor*, che consente l'interazione con il sistema e con la base dati, sia in termini di input che di output, permettendo di visualizzare queste informazioni in maniera immediata.

A questo sistema, così configurato, si aggiunge un'ulteriore interfaccia *Traffic Portal*, destinata ai gestori e all'utenza, dove poter visualizzare lo stato del traffico attuale e futuro, ed essere informati sulla presenza di eventuali eventi anomali sulla rete.

Queste interfacce, che saranno analizzate nei due paragrafi successivi, risultano essere estremamente utili, e in alcuni casi addirittura fondamentali, per fornire un valido supporto alle decisioni, sia in fase di pianificazione che di gestione dinamica della rete.

### **5.6.1 Interfaccia operatore – Traffic Supervisor**

*Traffic Supervisor* è l'interfaccia operatore del sistema OPTIMA. Si tratta della realizzazione di un'applicazione web in grado di offrire una semplice ed intuitiva interfaccia per la gestione e la visualizzazione dei contenuti e dei dati di traffico (come ad esempio la visualizzazione dello stato del traffico attuale, storico ed eventualmente previsto).

Questa interfaccia grafica sfrutta le consolidate tecniche di accessibilità definite comunemente come web 2.0: in particolare, le informazioni vengono fornite sia in formato testuale che grafico, attraverso una mappa dotata di funzionalità di pan e zoom dinamiche, mediante icone reattive alla selezione tramite click, mostrando all'operatore le informazioni relative attraverso un meccanismo di popup.

La misura ed osservazione dei dati tramite Traffic Supervisor consistono nell'identificazione sistematica e nella rappresentazione organica ed accessibile delle seguenti categorie di dati:

- *caratteristiche statiche* relative all'infrastruttura stradale e ad elementi presenti su di essa, come la geometria della rete costituita da archi e nodi, eventuali dispositivi di rilievo installati sull'infrastruttura, ecc., e per ciascuno di essi è possibile conoscerne i relativi attributi (ad esempio per un arco sono noti il codice identificativo, il numero di corsie, la lunghezza, la capacità, il nome della strada a cui appartiene l'arco, ecc.);
- *caratteristiche dinamiche* relative alla circolazione sull'infrastruttura, in termini di flusso, velocità e tempi di percorrenza attuali e previsti, nonché la presenza di eventuali eventi (incidenti, congestione e presenza di code, lavori di manutenzione, ecc.) presenti sulla rete.

L'informazione grafica viene fornita sulla base di "strati informativi", o più semplicemente di layers. Un *layer* rappresenta un insieme di informazioni visualizzate sulla

mappa principale di Traffic Supervisor. Un singolo layer può rappresentare un insieme di dati statici (come i collegamenti e i nodi della rete) o dati dinamici (come lo stato del traffico attuale o previsto o lo stato di un sensore di rilievo installato sul campo). Pertanto, i layers rappresentano l'entità base con cui l'operatore può interagire con il sistema: selezionandoli è possibile ottenere le informazioni sullo stato degli elementi della rete (come lo stato corrente del traffico su un link specifico) o inserire degli eventi con caratteristiche specifiche.

In sintesi, tale interfaccia offre le seguenti funzionalità:

- visualizzazione dello stato corrente e previsto del traffico: realizzata per classi di spessore dei diversi tratti stradali monitorati (*links*), che rappresentano la quantità di veicoli in transito, e per classi di colore (dal verde, al giallo-arancio-rosso, fino al nero), che rappresentano, invece, il grado di congestione presente;
- visualizzazione dello stato dei sensori di rilievo (*count locations*) connessi al sistema e delle relative misure inviate;
- visualizzazione delle velocità (*speeds*) fornite dai veicoli sonda connessi al sistema;
- per un dato arco stradale soggetto a monitoraggio sia tramite sensori fissi che mediante veicoli sonda (FCD), è possibile visualizzare i profili temporali delle variabili caratterizzanti lo stato del traffico per il giorno corrente;
- la possibilità di inserire, visualizzare e modificare manualmente eventi (ad esempio incidenti o lavori in corso).

Di seguito si riportano alcune delle esemplificazioni dell'interfaccia web per le diverse funzionalità previste. La Figura 5.39 mostra l'interfaccia TrafficSupervisor, che permette di selezionare i layers da visualizzare sulla mappa, in questo caso lo stato del traffico sulla rete.

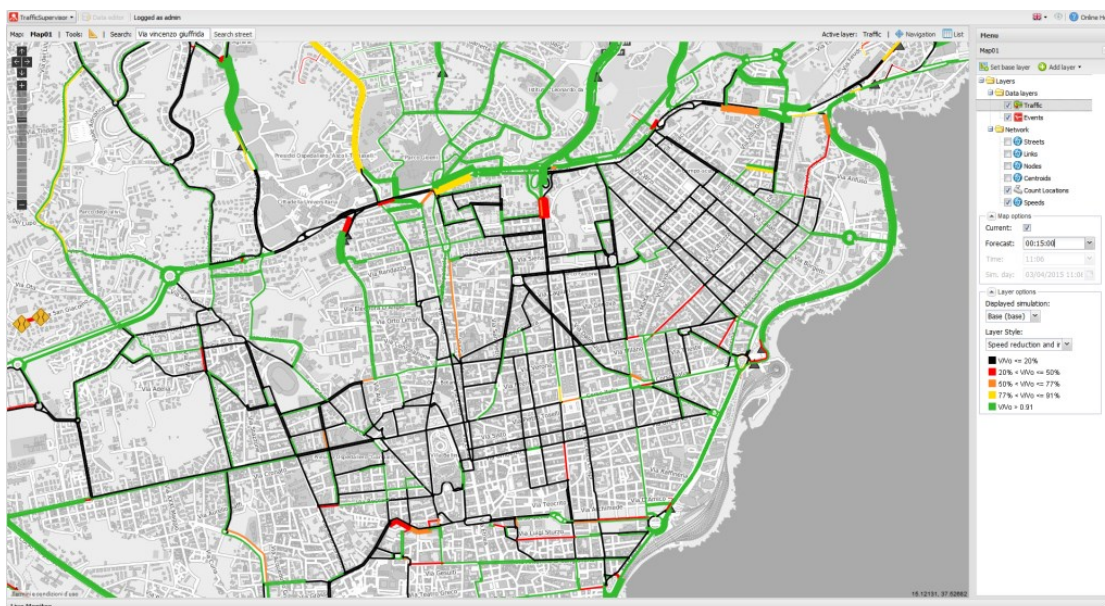


Figura 5.39 TrafficSupervisor: Visualizzazione dello stato di traffico sulla rete

È, inoltre, possibile monitorare in real-time l'andamento dei flussi di traffico e dei tempi di percorrenza su ciascun arco (Figura 5.40) e visualizzare lo stato e i dati rilevati di ciascuna sezione di monitoraggio.

Infine, in Figura 5.41 è mostrato l'inserimento di un evento (incidente) e il monitoraggio degli effetti di quest'ultimo sulla rete.



Figura 5.40 TrafficSupervisor: Monitoraggio real-time dei flussi di traffico

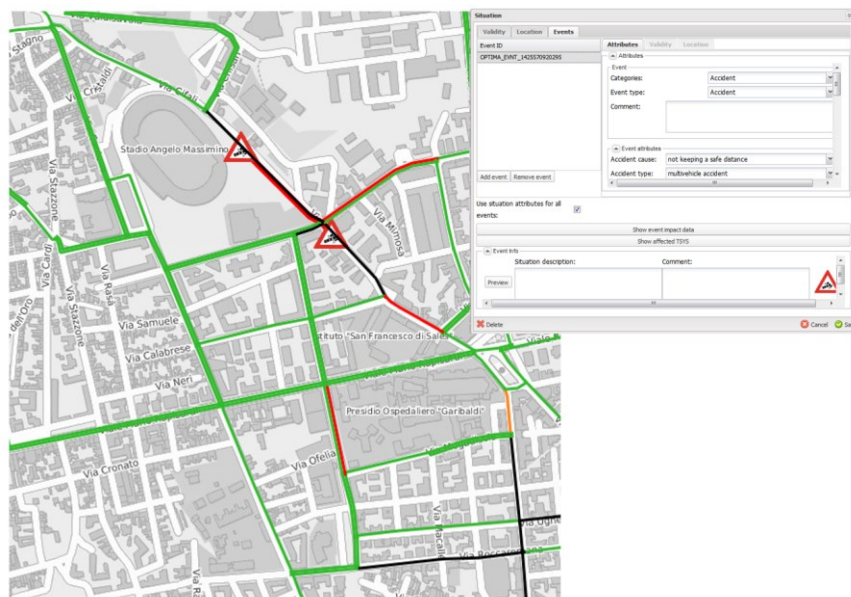


Figura 5.41 TrafficSupervisor: Inserimento di eventi di traffico (incidente) con monitoraggio e previsione degli effetti

## 5.6.2 Interfaccia utente - Traffic Portal

*Traffic Portal* rappresenta un portale web in grado di fornire un'informazione dinamica sul traffico e, più in generale, sulle condizioni dell'intera rete di trasporto.

Le informazioni fornite da questo portale si riferiscono:

- alle condizioni correnti di deflusso sulla rete stradale (Figura 5.42);
- alle previsioni al quarto d'ora successivo fino all'ora dei flussi di traffico sulla rete;
- ad episodi di congestione;
- al verificarsi di incidenti o manifestazioni;
- alla presenza di eventuali lavori di manutenzione (Figura 5.43);
- ecc.

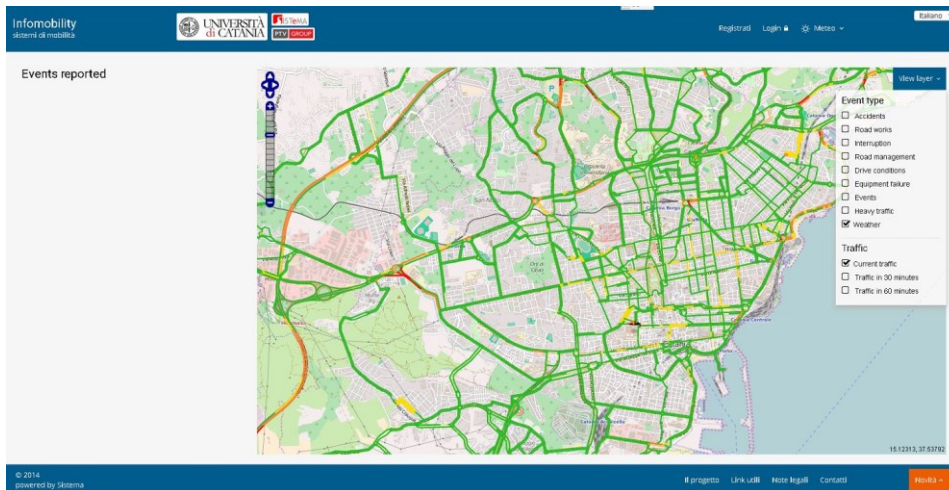


Figura 5.42 Traffic Portal: Visualizzazione delle condizioni correnti di deflusso

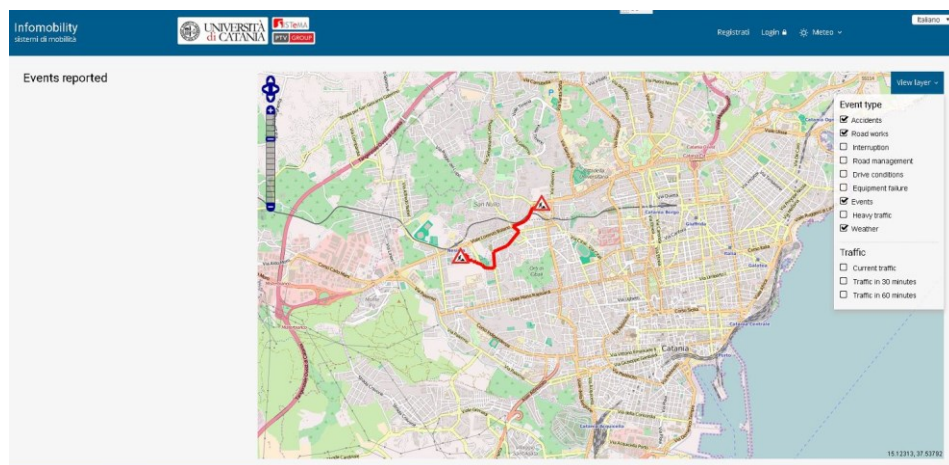


Figura 5.43 Traffic Portal: Segnalazione della presenza di lavori di manutenzione



L'importanza di questo sistema di informazione dinamico risiede nel fatto che un'informazione accurata e precisa risulta utile sia nei confronti dei gestori della rete e dei servizi che dei viaggiatori. Pertanto, questa interfaccia consente la profilazione di diversi utenti, definendo quale tipo di azione (visualizzare, modificare, eliminare, ecc.) ciascun utente può eseguire su ciascun elemento del sistema (ad esempio sensori, PMV, ecc.).

## 5.7 Servizi di routing e infomobilità

La diffusione dei sistemi automatizzati di monitoraggio delle reti stradali ha reso disponibile una grande quantità di dati (flusso, densità e velocità dei veicoli in corrispondenza di determinate sezioni), sia storici e in tempo reale, in grado di descrivere lo stato di molti archi della rete e la loro evoluzione nel tempo. Attraverso, poi, modelli di simulazione, è possibile propagare queste informazioni e conoscere, così, lo stato di funzionamento dell'intera rete.

In parallelo, l'attuale distribuzione di tecnologie per le comunicazioni mobili e di posizionamento satellitare forniscono ai singoli viaggiatori informazioni in tempo reale utili per un supporto dinamico alle decisioni e attuazioni di strategie adattative.

La predisposizione di servizi informativi di infomobilità consiste nella trasformazione dei dati disponibili all'interno del database del sistema in informazioni fruibili da parte degli utenti finali. Occorre, dunque, definire gli obiettivi dell'informazione, il target di utenti, il contesto, le modalità di fruizione, il canale di distribuzione, la frequenza di aggiornamento, ecc.

In particolare, i sistemi avanzati di informazione ai viaggiatori, ATIS – *Advanced Traveller Information Systems* –, sono finalizzati a distribuire informazioni sullo stato delle reti di traffico, allo scopo di assistere i viaggiatori nel compiere scelte di viaggio più consapevoli ed informate e suggerire ai guidatori i percorsi migliori sulla base delle condizioni attuali e future del traffico in tutta la rete e delle stime dei tempi di viaggio.

La tecnologia di trasmissione delle informazioni può essere basata su sistemi generalisti o sistemi personali. I più diffusi tra i primi sono i sistemi di broadcasting o i pannelli a messaggio variabile (VMS – Variable Message Sign). I secondi sono per lo più basati su sistemi a bordo vettura o smartphone individuali e sono di fatto dei sistemi di navigazione.

Nel seguito sono affrontate le due tipologie di sistemi di trasmissione delle informazioni utilizzati.

### 5.7.1 Pannelli a Messaggio Variabile

I Pannelli a Messaggio Variabile (PMV) rappresentano gli strumenti di informazione utilizzati per erogare servizi di infomobilità relativi ad informazioni acquisite mediante dei mezzi che non raggiungono direttamente i guidatori all'interno del proprio veicolo. Tali pannelli hanno, dunque, lo scopo di catturare l'attenzione dell'utente che, dall'interno del suo abitacolo, viene informato su ciò che lo attende sul tratto stradale che si accinge a percorrere.

Mediante l'utilizzo di questi cartelli segnaletici, vengono fornite indicazioni sulle condizioni di traffico e di circolazione presenti su un tratto stradale. Tuttavia, il contenuto delle informazioni non si limita soltanto ai dati inerenti alle condizioni di traffico ma, all'occorrenza, i PMV suggeriscono percorsi alternativi, tempi previsti di percorrenza e avvisi utili per la scelta del percorso ottimale rispetto alla situazione di congestione, ricordando, inoltre, il rispetto delle regole di circolazione compresi i limiti di velocità.

In generale, per essere correttamente percepiti dagli utenti, i PMV devono avere le seguenti caratteristiche: visibilità, leggibilità, comprensibilità, credibilità. Di esse, solo la leggibilità è una qualità intrinseca dei pannelli, mentre la visibilità dipende sia dal tipo di pannello che dal sito di installazione e dal tipo di messaggio. Le rimanenti caratteristiche conseguono da una corretta gestione dei PMV.

Nella pratica, i messaggi riportati dai PMV utilizzati sono caratterizzati da un testo di tipo alfanumerico (Figura 5.44), anche se spesso si ricorre all'abbinamento di una segnaletica fissa o, qualora il pannello lo permetta, di un'immagine grafica (pittogramma).



Figura 5.44 Informazione sullo stato del traffico esposta su PMV

Questi pannelli, attualmente collocati presso il laboratorio dell'Università di Catania, saranno dislocati sull'infrastruttura viaria e rappresenteranno uno strumento utile per la fornitura di servizi di infomobilità e di informazione diretta all'utenza.

## 5.7.2 Implementazione del cerca-percorso dinamico Hyperpath

Il sistema ITS di Catania è stato integrato implementando un modulo aggiuntivo per l'offerta di servizi di routing dinamico.

Prima di entrare nel merito delle specifiche di tale sistema di cerca-percorso, è importante analizzare la distinzione fra navigazione "statica" e "dinamica".

Un navigatore statico consente di ottenere il percorso fra un punto di origine e una destinazione sulla base di valori fissi e invarianti delle impedenze dei singoli archi della rete stradale. Infatti, i costi sulla base dei quali si calcola la convenienza di un percorso rispetto ad un altro sono generalmente la lunghezza o il tempo di viaggio ritenuto "medio" sui diversi archi stradali e sono valori fissi e costanti, definiti in funzione del contesto e delle caratteristiche fisico-funzionali delle strade stesse.

Il calcolo del percorso viene effettuato avendo la possibilità di scegliere se si vuole il percorso più veloce, più corto, solo autostradale, solo per i mezzi pesanti (che corrisponde a pesare in modo opportuno un costo "generalizzato", o operare su un sottoinsieme di archi della rete), ma in ogni caso il risultato è indipendente dal momento in cui si fa la richiesta.

Con l'avvento degli attuali sistemi *Multimodal Traveller Information Systems*, la definizione di navigatore dinamico è, invece, più complessa. Si intende un navigatore che consente di avere il percorso sulla base di valori delle impedenze variabili in funzione delle reali condizioni di traffico dei singoli archi della rete stradale (espressa sempre sotto forma di grafo della mappa stradale).

Il cerca-percorso dinamico adoperato si muove in questa direzione, integrando la mappa con delle informazioni aggiuntive: le impedenze "time dependent", cioè informazioni discretizzate al quarto d'ora che hanno, quindi, una loro validità nel tempo. L'utilizzo di dati "dinamici", variabili nel tempo con risoluzione dell'ordine della frazione di ore comporta anche la necessità di aggiornare gli algoritmi di determinazione del percorso, operazione realizzata mediante l'ausilio del modello di simulazione su cui si basa la metodologia di questa ricerca. Infatti, grazie a quest'ultimo, oltre alle impedenze time dependent, vengono aggiunte anche informazioni sull'evoluzione del traffico in tempo reale, tenendo così conto dell'evoluzione della congestione dopo la richiesta di percorso: questo ne garantisce la sua

validità per tutta la durata dello spostamento, dal momento che il viaggio progredisce nello spazio e nel tempo così come le condizioni di traffico mutano nel tempo in ciascun luogo.

*Hyperpath* è il cerca-percorso intermodale e multimodale dinamico integrato all'interno dell'architettura funzionale del sistema ITS di Catania, interfacciandosi con VISUM, per la parte di modellazione e pianificazione della rete multimodale, e con OPTIMA per la conoscenza delle stime e previsioni di traffico sulla rete. Esso, infatti, tenendo conto delle condizioni attuali e future del traffico, è in grado di effettuare un servizio di routing su una rete di trasporto multimodale e di fornire agli utenti, in tempo reale e per uno specifico istante temporale, l'opzione di spostamento migliore tra due qualsiasi punti dati nell'area coperta da questo servizio. Il percorso, inoltre, può essere programmato tenendo conto di tappe intermedie o impostando profili particolari di velocità, quali per esempio, autovetture, mezzi pubblici o pedoni, ottenendo informazioni sull'ora di arrivo prevista, la distanza e il tempo di viaggio restante (Figura 5.45).

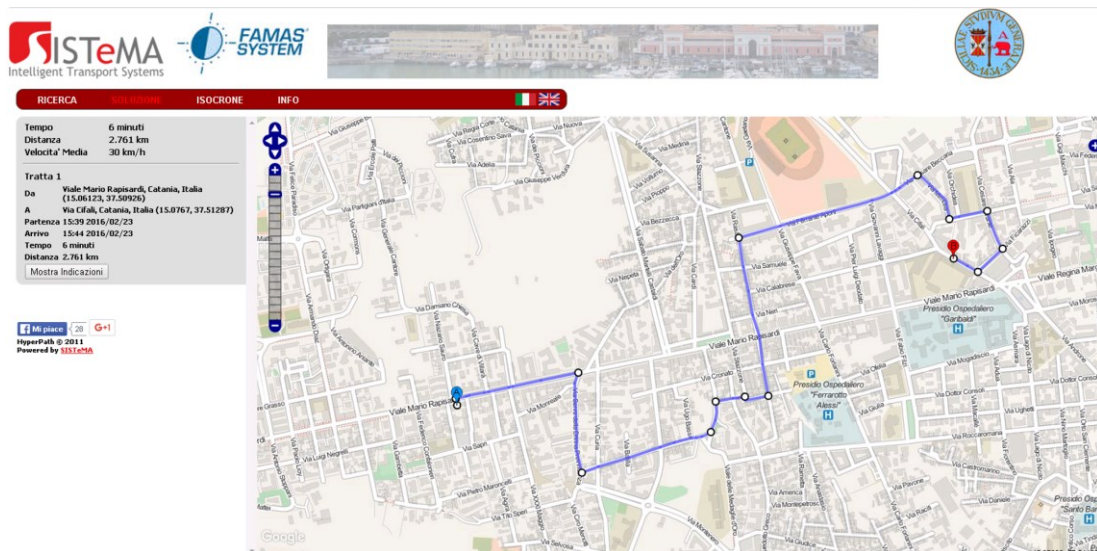


Figura 5.45 Interfaccia grafica del cerca-percorso Hyperpath

L'utente che si appresta ad intraprendere un viaggio ha, quindi, a disposizione tutta una serie di informazioni per poter pianificare il proprio itinerario ed ottimizzarlo. Ad esempio, può decidere in maniera efficiente quando partire al fine di evitare code e congestioni, in situazioni in cui piccole differenze nel tempo di partenza comportano grosse differenze nel tempo di arrivo. Inoltre, trattandosi di un cerca-percorso, oltre che dinamico, multimodale, una volta scesi dal veicolo o dal mezzo di trasporto, possono essere acquisite informazioni per compiere l'ultimo tratto dello spostamento ed arrivare alla destinazione scelta.

Per permettere tutto questo, le informazioni devono essere precise e sempre disponibili, ventiquattrore al giorno, e la fase di acquisizione delle informazioni deve essere continua anche durante il viaggio.

Come detto precedentemente, Hyperpath effettua il calcolo personalizzato del percorso includendo nella fase di computazione i dati relativi ai flussi di traffico e alle velocità provenienti dalle simulazioni di OPTIMA, tenendo conto della loro condizione nell'istante in cui viene formulata la richiesta di percorso, che della loro evoluzione per tutta la durata dello spostamento. La Figura 5.46 mostra l'interfacciamento diretto tra Hyperpath e il database di Optima: nell'immagine a sinistra è visualizzata l'interfaccia grafica di OPTIMA nella quale è possibile vedere la presenza di incidente sulla rete; Hyperpath acquisisce questa informazione, ed automaticamente fornisce un percorso alternativo, come mostrato nell'altra immagine sulla destra. Questa applicazione è accessibile, oltre che da web, anche tramite dispositivo mobile, ed è quindi capace di guidare l'utente durante lo spostamento.

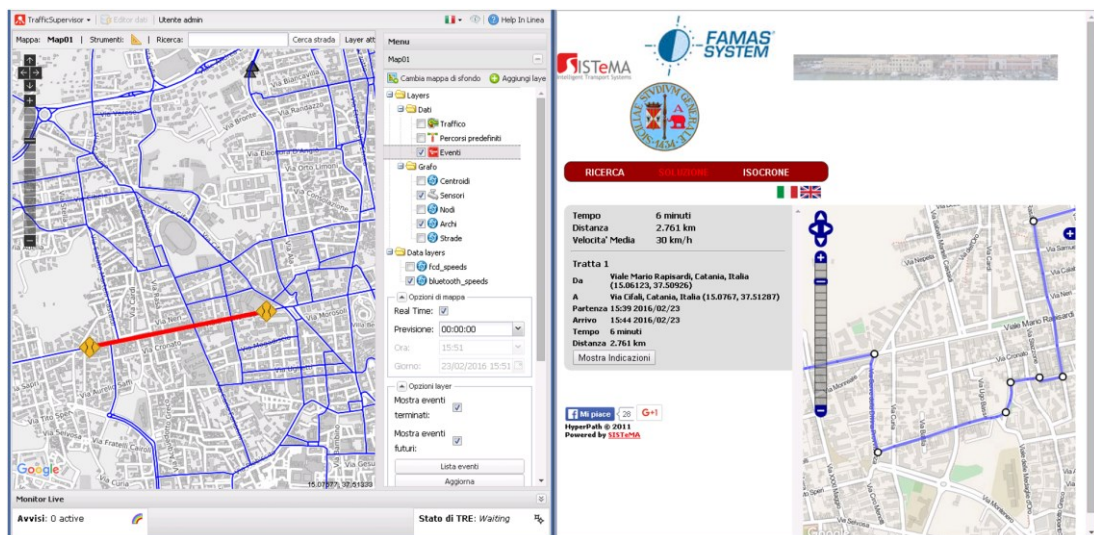


Figura 5.46 Sincronismo tra OPTIMA e il servizio di routing di Hyperpath

Dunque, l'utilizzo di questo journey-planner aiuta i guidatori a prendere in considerazione percorsi alternativi, i cui itinerari sono variabili in funzione del grado di congestione e, quindi, ad evitare grossi inconvenienti, offrendo un vantaggio sicuro in tutte le condizioni di traffico (Figura 5.47).

Inoltre, poiché aiuta a mantenere la rete in condizioni di equilibrio (e quindi riducendo le congestioni) offre un beneficio anche agli utenti che non usano il navigatore e trovano, comunque, condizioni di traffico migliori.

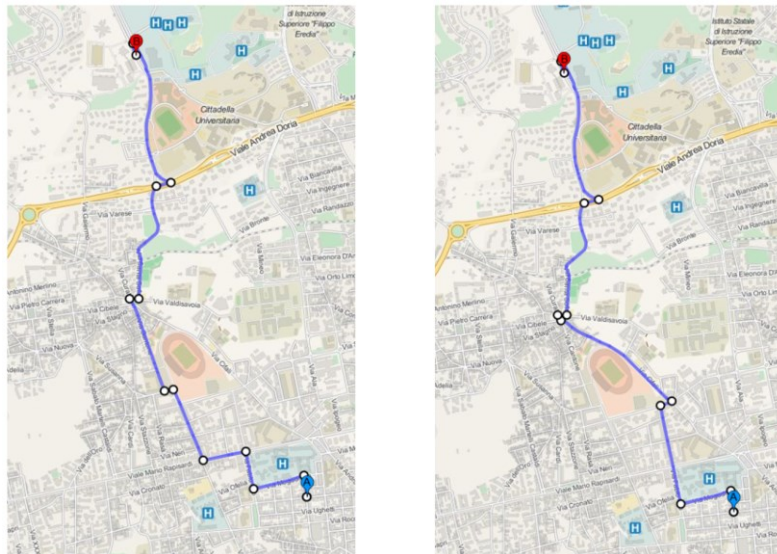


Figura 5.47 Variazione di percorso in seguito ad un evento anomalo nella rete

## 5.8 Implementazione e configurazione del modulo ambientale Habitat

Le strategie di controllo e gestione del traffico per migliorare la qualità dell'aria in ambiente urbano mirano a mantenere in movimento i veicoli sulla rete viaria nel modo più uniforme possibile, in modo da ridistribuire le code e limitare, così, il fenomeno della congestione. Al fine di controllare e gestire l'impatto del traffico stradale sulla qualità dell'aria, per quanto esposto, è necessario monitorare, prevedere e gestire i flussi di traffico. Il monitoraggio congiunto del traffico e dei livelli di inquinamento è, infatti, il primo passo per la corretta gestione del sistema di trasporto nel suo complesso, con l'obiettivo di ottimizzare le risorse in esso investite e i costi sia interni che esterni prodotti dal sistema di trasporto.

In linea con quanto appena detto, per potenziare le prestazioni del sistema ITS di Catania, si è proceduto all'integrazione di un modulo ambientale – *Habitat* – per il calcolo delle emissioni inquinanti prodotte dal traffico veicolare.

*Habitat* è basato sulla metodologia COPERT IV e utilizza come fonte di dati e di eventi di traffico i risultati generati dal modello di previsione di OPTIMA.

Per quanto riguarda la composizione della flotta, è basata sulla consistenza del parco veicolare della federazione ACI (Automobile Club d'Italia) per la provincia di Catania e il calcolo delle emissioni è eseguito sulla base dei contenuti della guida tecnica "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2013".

Questo modulo ambientale è in grado di restituire i valori stimati di emissione per ogni arco appartenente alla rete di assegnazione di OPTIMA, operando una procedura di ricalcolo di questi ultimi ad ogni simulazione (ogni 15 minuti), per l'arco temporale della previsione (solitamente 60 minuti).

All'interno del modulo sono già implementate di default le emissioni a caldo di CO, NO<sub>x</sub>, HC, CO<sub>2</sub>, PM, FC (fuel consumption), ma risulta customizzabile, permettendo di modificare e personalizzare altre funzioni, ad esempio per aggiungere tipi di esternalità, aggiungere classi veicolari, modificare la composizione della flotta, ricalibrare il modello, implementare altre metodologie (mediante la configurazione delle funzioni di emissione).

Tale modulo sarà utilizzato anche dal cerca-percorso Hyperpath, con l'obiettivo di restituire le emissioni lungo i percorsi dati ed individuare, così, configurazioni di traffico sulla rete alle quali sono associate minori emissioni e che minimizzano l'impatto ambientale.

## **5.9 Valutazione dei flussi di traffico rilevati e stimati**

Al fine di valutare l'affidabilità dei dati del sistema ITS, ed in particolare dei valori dei flussi di traffico, è stata eseguita un'analisi sia dei flussi rilevati in campo mediante monitoraggio automatico dai dispositivi installati sull'infrastruttura stradale, sia di quelli stimati mediante il modello di simulazione.

Per raggiungere questo obiettivo, sono stati effettuati dei confronti tra questi dati e i valori dei flussi rilevati in campo da operatori mediante la tecnica di rilievo manuale, ed inoltre è stata compiuta un'analisi statistica dei risultati.

L'arco temporale analizzato ha consentito la registrazione di una situazione considerevole quale media, caratterizzata da un ampio spettro di spostamenti, con attività socio-economiche e servizi a regime.

Nei paragrafi successivi si presentano le risultanze ottenute da queste indagini, sia per le sezioni dotate di rilevatore che per le sezioni in cui il traffico viene simulato dal modello.

### **5.9.1 Analisi dei flussi per le sezioni dotate di rilevatore**

Le sezioni di rilievo per quest'analisi sono state fissate in corrispondenza di alcuni dei siti di installazione dei sensori, cercando di analizzare le diverse configurazioni presenti, a seconda della tipologia della sezione stradale (una o due corsie per senso di marcia), dell'entità del flusso (ininterrotto o caratterizzato da rallentamenti) e della posizione del sensore sull'infrastruttura (centrale o laterale).

Il dimensionamento del programma di indagini effettuato ha interessato complessivamente 11 sezioni bidirezionali in cui è stato effettuato il conteggio manuale dei veicoli. Le sezioni risultano così distribuite sul territorio dell'area di studio:

- Sezione 1: MT1 – Viale Presidente Kennedy;
- Sezione 2: MT5 – Via Palermo;
- Sezione 3: MT6a-MT6b – Superstrada Catania-Paternò;
- Sezione 4: MT8 – Via Galermo;
- Sezione 5: MT10a-Mt10b – Via Passo Gravina;
- Sezione 6: MT11 – Via Leucatia;
- Sezione 7: MT12a-MT12b – Viale Mediterraneo;
- Sezione 8: MT14a-MT14b – Viale Giuseppe Lainò – Viale Enzo Longo;
- Sezione 9: MT 15 Via Messina;
- Sezione 10: MT17a-MT17b Viale Africa-SS114;
- Sezione 11: MT19a-MT19b Viale Ruggero di Lauria.

I conteggi dei flussi veicolari in corrispondenza di queste sezioni sono stati svolti tra l'11.05.2015 e il 28.11.2015 e sono state analizzate le seguenti fasce orarie:

- una fascia oraria mattutina dalle 8:00 alle 9:00
- una fascia oraria intermedia dalle 13:00 alle 14:00
- una fascia oraria serale dalle 19:00 alle 20:00

nei giorni di lunedì e giovedì, per una durata pari a due settimane di rilievo consecutive.

Durante il rilievo manuale, i veicoli sono stati conteggiati secondo una suddivisione in classi semplificata rispetto a quella operata dal sensore, dal momento che tale classificazione viene eseguita, non sulla base della misura della lunghezza del veicolo, bensì su un rilievo esclusivamente visivo.

Sono state fissate, dunque, 5 classi veicolari:

1. moto;
2. autovetture;
3. veicoli commerciali leggeri;
4. veicoli commerciali pesanti;
5. autobus.

La Figura 5.48 mostra un esempio di scheda utilizzata per eseguire il rilievo, nella quale è indicato il giorno di svolgimento e la fascia oraria analizzata, viene identificata la sezione e l'eventuale verso di percorrenza preso in considerazione ed è registrato il flusso transitante nella stessa, segnando il passaggio di ogni singolo veicolo. In questa tabella vengono indicate, inoltre, eventuali sovrapposizioni di veicoli marcianti nello stesso senso di marcia e possibili anomalie, quali incidenti, code o presenza di pedoni davanti al sensore.



Sezione MT 1      Giorno 28/04/2015

	8:05	8:10	8:15	8:20	
Autovetture					
Moto					
Veicoli commerciali leggeri					
Veicoli commerciali pesanti					
Autobus					
Anomalie					

Figura 5.48 Esempio di compilazione della scheda di rilievo

Una volta acquisiti i dati, questi sono stati aggregati in sole due classi veicolari – veicoli leggeri (auto e moto) e veicoli pesanti (veicoli commerciali leggeri e pesanti ed autobus) – e riferiti ad intervalli di durata pari a 5 minuti.

Mediante l’ausilio di un foglio di calcolo Excel è stato possibile effettuare un confronto di questi dati con quelli provenienti dai sensori ed effettuare le elaborazioni necessarie allo svolgimento di un’approfondita analisi statistica.

A seguire, a titolo esemplificativo, si riportano i risultati ottenuti per una delle sezioni analizzate.

**SEZIONE ANALIZZATA**

Tra le 11 sezioni oggetto di analisi, la sezione considerata ai fini della produzione dei risultati ottenuti e riportati qui di seguito è la sezione 8 (MT14a-MT14b) situata in Viale Giuseppe Lainò – Viale Enzo Longo, come riportato in Figura 5.49.

Tale sezione è caratterizzata da:

- 2 carreggiate separate da uno spartitraffico centrale;
- 2 corsie per senso di marcia, denominate *Corsia 1* e *Corsia 2*, con di norma la corsia 1 quella più vicino al sensore;
- 2 sensori, MT14a e MT14b, uno per senso di marcia, posti in corrispondenza dello spartitraffico centrale.



Figura 5.49 Localizzazione sezione 8 – Viale Giuseppe Lainò - Viale Enzo Longo

### **DATI RILEVATI**

La sezione *MT14a* rileva i flussi transittanti da Catania verso Cannizzaro (direzione Est), e considera la corsia di soprasso come *Corsia 1*, mentre la corsia di macia ordinaria come *Corsia 2*.

La sezione *MT14b* rileva, invece, i flussi transittanti da Cannizzaro verso Catania (direzione Ovest) e, anche in questo caso, considera la corsia di soprasso come *Corsia 1*, mentre la corsia di macia ordinaria come *Corsia 2*.

I rilevamenti sono stati effettuati, come stabilito precedentemente, durante le seguenti fasce orarie 8:00-9:00, 13:00-14:00 e 19:00-20:00 e nei giorni di lunedì e giovedì, per due settimane consecutive di rilievo.

### **ELABORAZIONI EFFETTUATE**

#### **1. Sensore MT14a – lunedì 11/05/2015 – 8:00-9:00**

La prima analisi eseguita prevede il confronto numerico diretto tra i dati rilevati in campo dall'operatore e quelli rilevati dal sensore.

I valori dei flussi veicolari dei veicoli leggeri, pesanti e totali rilevati dal sensore e in campo nell'intervallo di tempo che va dalle 8:00 alle 9:00 sono riportati di seguito in Tabella 5.2 e Tabella 5.3, e messi a confronto nei grafici in Figura 5.50, Figura 5.51 e Figura 5.52.

Tabella 5.2 Flusso veicolare sensore nei 5 min.– MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00

Data e ora	Veicoli leggeri SENSORE	Veicoli pesanti SENSORE	Veicoli totali SENSORE
11/05/2015 08:05	77	3	80
11/05/2015 08:10	84	4	88
11/05/2015 08:15	71	1	72
11/05/2015 08:20	71	0	71
11/05/2015 08:25	53	1	54
11/05/2015 08:30	88	6	94
11/05/2015 08:35	71	3	74
11/05/2015 08:40	62	0	62
11/05/2015 08:45	61	3	64
11/05/2015 08:50	57	2	59
11/05/2015 08:55	63	2	65
11/05/2015 09:00	53	4	57

Tabella 5.3 Flusso veicolare campo nei 5 min. –MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00

Data e ora	Veicoli leggeri IN CAMPO	Veicoli pesanti IN CAMPO	Veicoli totali IN CAMPO
11/05/2015 08:05	77	2	79
11/05/2015 08:10	90	2	92
11/05/2015 08:15	75	0	75
11/05/2015 08:20	73	0	73
11/05/2015 08:25	56	1	57
11/05/2015 08:30	93	3	96
11/05/2015 08:35	77	2	79
11/05/2015 08:40	71	0	71
11/05/2015 08:45	58	3	61
11/05/2015 08:50	59	3	62
11/05/2015 08:55	66	1	67
11/05/2015 09:00	54	3	57

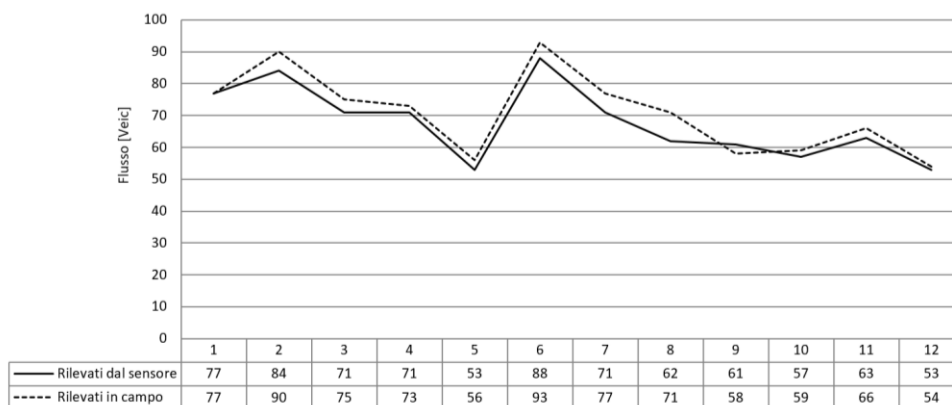


Figura 5.50 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min. –MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00

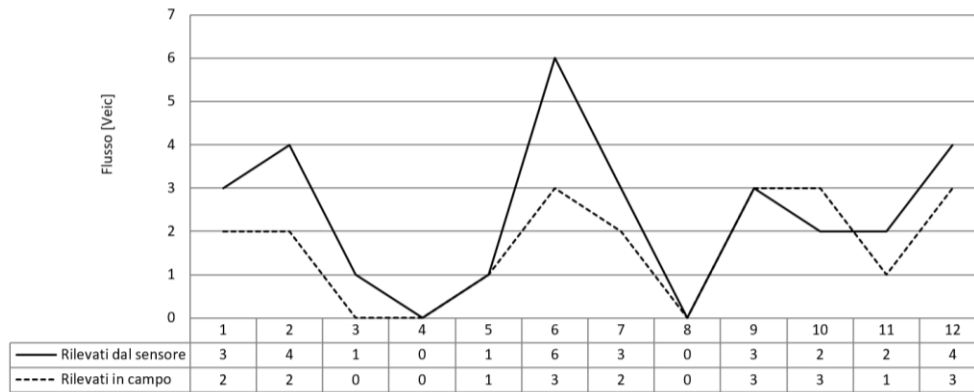


Figura 5.51 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.—MT14a –11/05/2015, 8:00-9:00

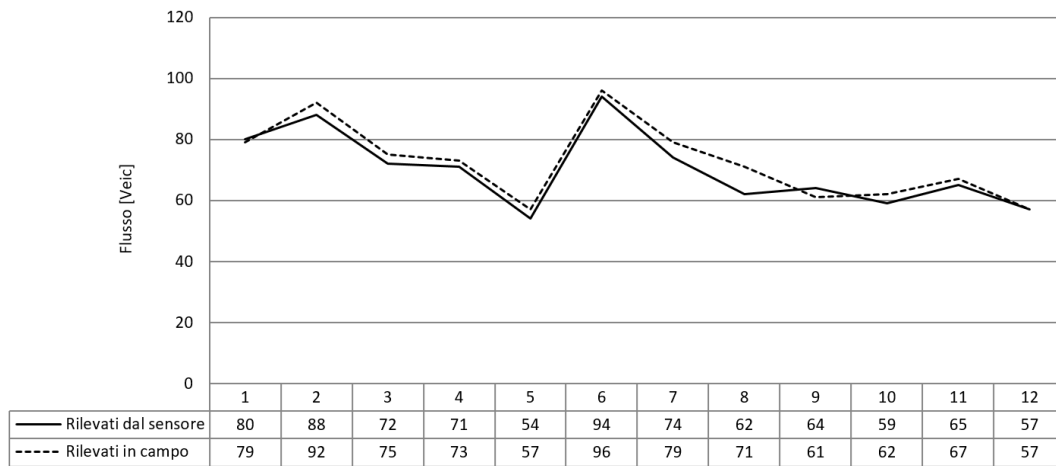


Figura 5.52 Veicoli totali rilevati nei 5 min. –MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00

Come si può ben notare dai grafici precedenti, si osserva una buona corrispondenza tra i dati rilevati dal sensore e quelli rilevati in campo dall’osservatore per le classi di veicoli leggeri e totali. Un maggiore scostamento si ha, invece, per la classe dei veicoli pesanti. Queste considerazioni trovano spiegazione a partire dai fenomeni fisici di oscuramento e sovrapposizione.

Nello specifico, osservando la Figura 5.50, si nota come la curva dei flussi leggeri rilevati in campo si trova, per quasi tutti gli intervalli di tempo della fascia oraria analizzata, al di sopra di quella rappresentante l’andamento dei flussi rilevati dal sensore. Ciò vuol dire, in pratica, che i veicoli rilevati tramite rilievo manuale sono superiori a quelli registrati dal sensore. Questo fatto accade a causa del *fenomeno di oscuramento*: nel caso in cui i due veicoli procedono parallelamente nello stesso senso di marcia e a velocità simili, si avrà un oscuramento totale da parte del furgone, transitante nella corsia 1 più prossima al sensore, nei confronti dell’autovettura transitante nella corsia 2 più lontana dal sensore (Figura 5.53).

Un altro fenomeno che può contribuire ad aumentare la differenza tra i veicoli leggeri rilevati in campo e quelli rilevati dal sensore è rappresentato in Figura 5.54: in questo caso quando i due veicoli procedono leggermente sfalsati, si avrà un oscuramento parziale del veicolo transitante sulla corsia 2, per cui il sensore ne rileva il transito ma non la categoria di appartenenza, portando ad uno scarto dei dati relativi al veicolo oscurato.

Con riferimento, invece, alla categoria dei mezzi pesanti, si nota dalla Figura 5.51 un fatto opposto a quello che si verifica per i mezzi leggeri, cioè che il numero dei veicoli rilevati dal sensore è superiore, o al più uguale, a quello che viene registrato sul campo. Questo può essere in parte attribuito al *fenomeno di sovrapposizione* di due o più veicoli leggeri che, una volta rilevati, vengono associati alla categoria di quelli pesanti come un unico veicolo.

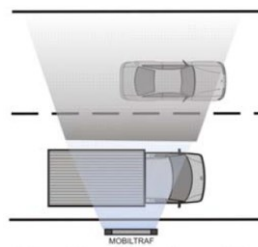


Figura 5.53 Fenomeno di oscuramento totale

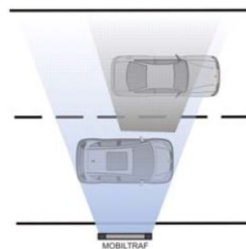


Figura 5.54 Fenomeno di oscuramento parziale

In seguito, effettuando l'analisi di affidabilità dei flussi di traffico, mediante la misura dello scostamento percentuale medio, sono stati ottenuti i risultati riportati di seguito, in Figura 5.55, Figura 5.56 e Figura 5.57.

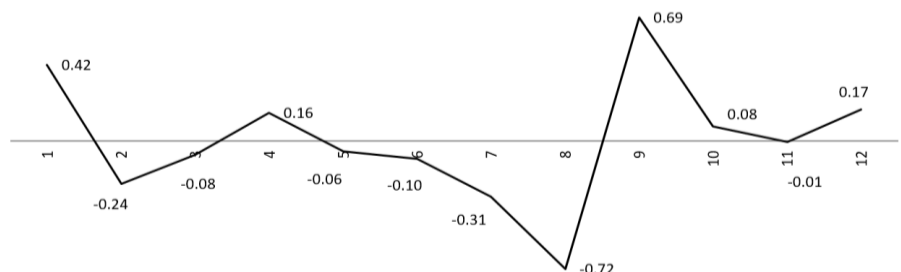


Figura 5.55 Analisi di affidabilità veicoli leggeri – MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00

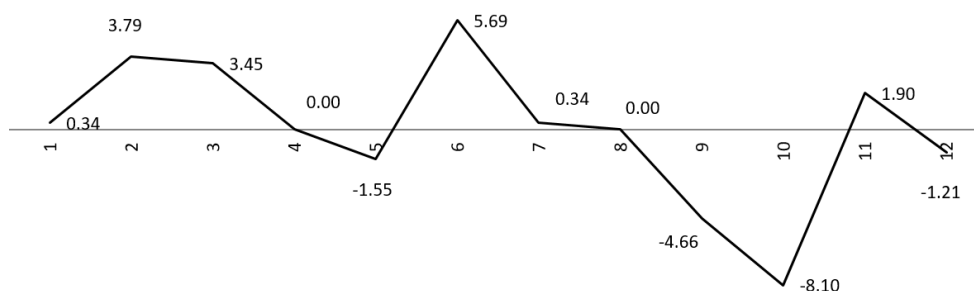


Figura 5.56 Analisi di affidabilità veicoli pesanti –MT14a– 11/05/2015, 8:00-9:00

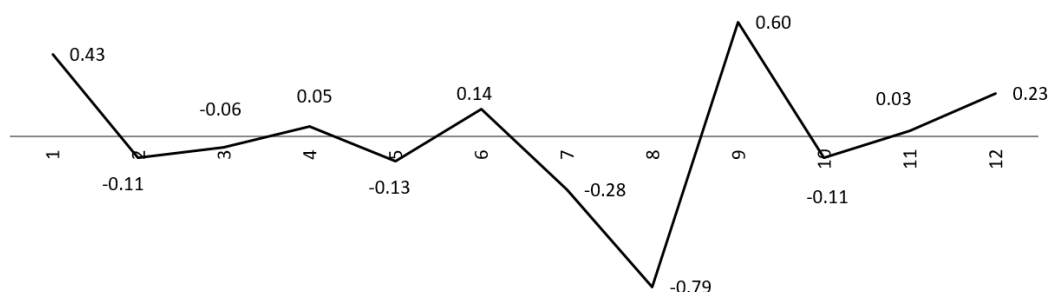


Figura 5.57 Analisi di affidabilità veicoli totali – MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00

I grafici mostrano, per i 12 intervalli di tempo considerati all'interno della fascia oraria di analisi, i valori delle differenze tra la percentuale di flusso orario rilevato dal sensore durante un intervallo di tempo e la percentuale di flusso orario rilevato in campo dall'operatore. Questi valori risultano essere inferiori per le due classi veicolari leggeri e totali, in particolare essi si mantengono ben al di sotto dell'unità. Viceversa, per la classe dei veicoli pesanti, si osservano valori più elevati, contribuendo ad aumentare il peso di questo fattore anche il numero ridotto di mezzi pesanti circolanti rispetto a quello dei veicoli leggeri. In generale, una considerazione valida per tutte e tre le analisi è che tanto più la curva si discosta dall'andamento orizzontale dell'asse delle ascisse, tanto minore è la precisione e l'affidabilità di rilievo del sensore.

Successivamente, l'analisi è proseguita con il calcolo di alcuni indici statistici. In particolare sono state calcolate le deviazioni standard e i relativi coefficienti di variazione per le due serie di dati rilevati dal sensore ed in campo. In questo caso, nelle formulazioni utilizzate il numero  $n$  di intervalli considerati è posto pari a 12, essendo i dati aggregati in intervalli di durata  $\Delta t$  pari a 5 minuti rispetto all'intero periodo di misurazione pari, invece, ad un'ora. Sono stati definiti, poi, i valori dei coefficienti di correlazione e di determinazione  $R^2$ . I risultati ottenuti sono riepilogati nella Tabella 5.4.

Tabella 5.4 Coefficienti – MT14a – 11/05/2015, 8:00-9:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.169
	Veicoli pesanti	0.737
	Veicoli totali	0.177
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.180
	Veicoli pesanti	0.739
	Veicoli totali	0.176
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.891
	Veicoli pesanti	0.747
	Veicoli totali	0.890
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.998
	Veicoli pesanti	0.881
	Veicoli totali	0.998

Dall'analisi dei valori dei coefficienti di correlazione, essendo in tutti e tre i casi superiori allo 0.7, si può affermare che tra i dati rilevati in campo dall'operatore e quelli rilevati dal sensore esiste una correlazione diretta abbastanza forte.

Per quanto riguarda il calcolo dei coefficienti  $R^2$ , questo è stato effettuato determinando l'equazione della retta interpolante i punti rappresentanti le due serie di dati rilevati. La precisione della retta interpolante calcolata dipende dal grado di dispersione dei dati. Più i dati sono lineari, come nel caso dei veicoli leggeri e totali, più il modello di regressione risulterà accurato. Da ciò deriva il fatto che, proprio per queste due classi sono stati ottenuti dei valori del coefficiente  $R^2$  maggiori, addirittura superiori allo 0.9. I grafici relativi a quest'analisi di regressione per le tre classi veicolari leggeri, pesanti e totali sono riportati in Figura 5.58, Figura 5.59 e Figura 5.60.

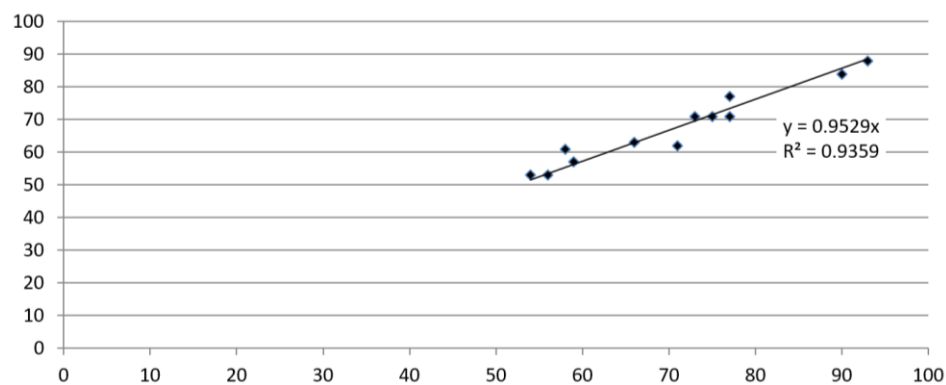


Figura 5.58 Interpolazione lineare e  $R^2$  veicoli leggeri, MT14a, 11/05/15, 8:00-9:00

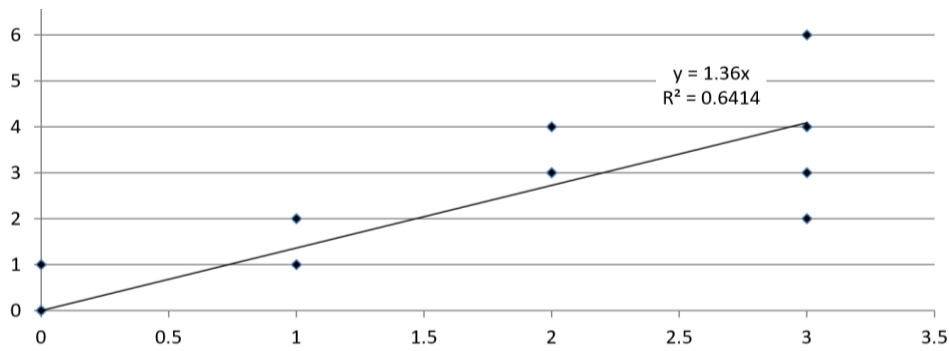


Figura 5.59 Interpolazione lineare e  $R^2$  veicoli pesanti, MT14a, 11/05/15, 8:00-9:00

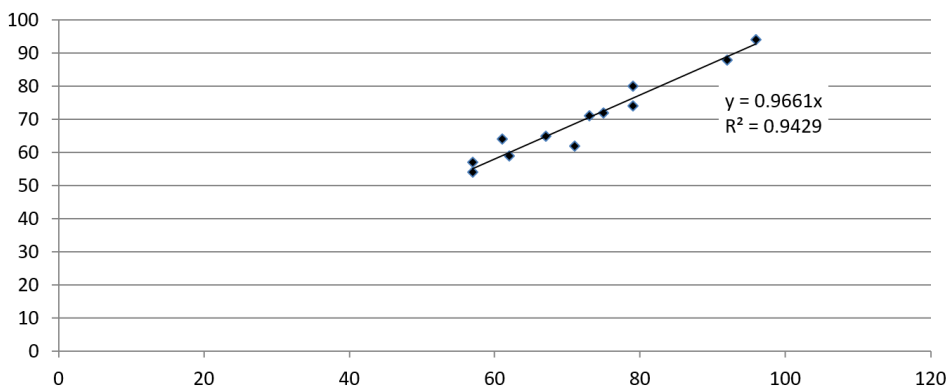


Figura 5.60 Interpolazione lineare e  $R^2$  veicoli totali, MT14a, 11/05/15, 8:00-9:00

Si riportano qui di seguito i risultati delle analisi effettuate nell'ambito della sezione MT14a per le altre fasce orarie e per i successivi giorni di rilievo.

La produzione dei risultati ottenuti, e quindi le tabelle e i grafici ottenuti per la sezione MT14b sono, invece, resi disponibili in allegato.

**2. Sensore MT14a – lunedì 11/05/2015 – 13:00-14:00**

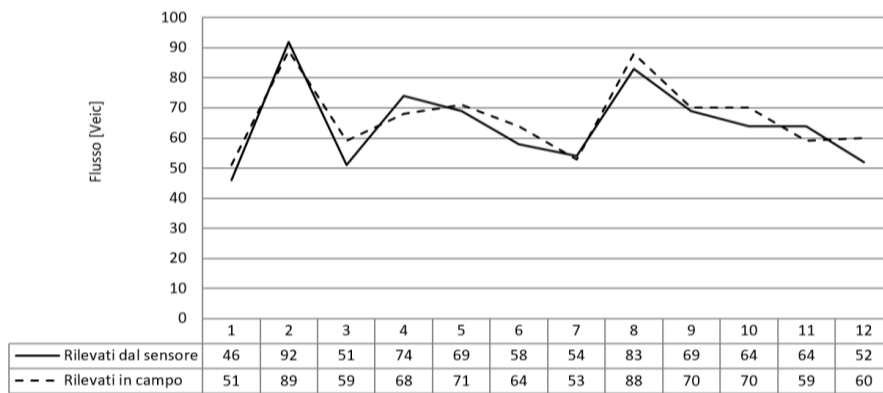


Figura 5.61 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14a-11/05/2015, 13:00-14:00



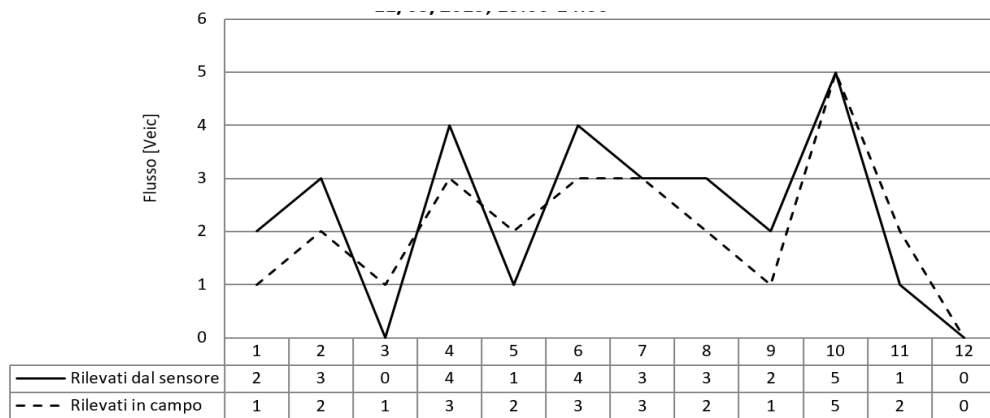


Figura 5.62 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min-MT14a-11/05/2015, 13:00-14:00

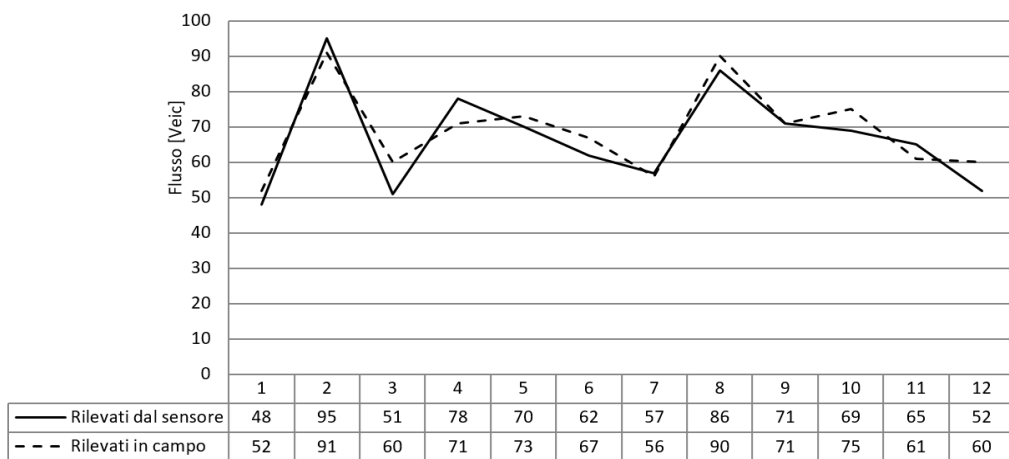


Figura 5.63 Veicoli totali rilevati nei 5 min.-MT14a-11/05/2015, 13:00-14:00

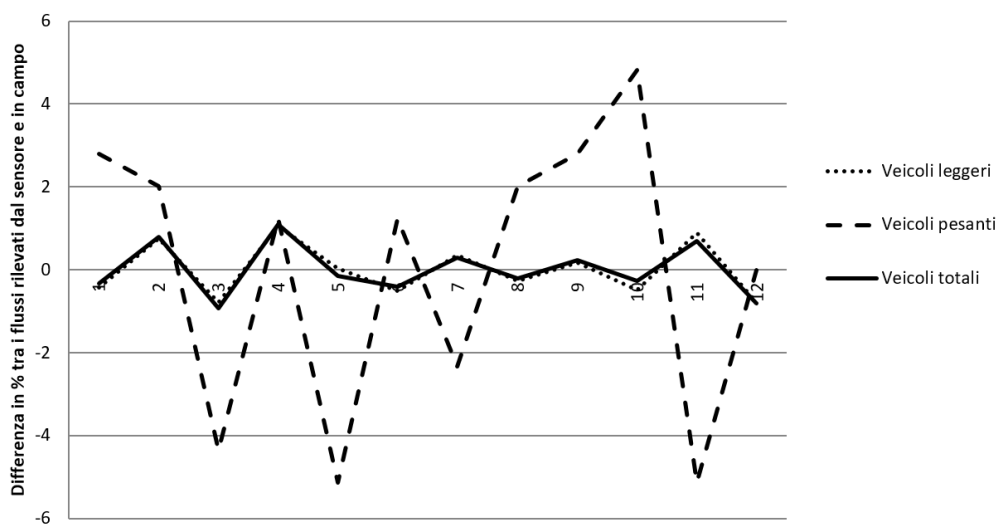


Figura 5.64 Analisi di affidabilità- MT14a-11/05/2015, 13:00-14:00

Tabella 5.5 Coefficienti – MT14a–11/05/2015, 13:00-14:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.212
	Veicoli pesanti	0.692
	Veicoli totali	0.214
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.180
	Veicoli pesanti	0.629
	Veicoli totali	0.179
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.856
	Veicoli pesanti	0.774
	Veicoli totali	0.860
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.995
	Veicoli pesanti	0.912
	Veicoli totali	0.995

**3. Sensore MT14a – lunedì 11/05/2015 – 19:00-20:00**

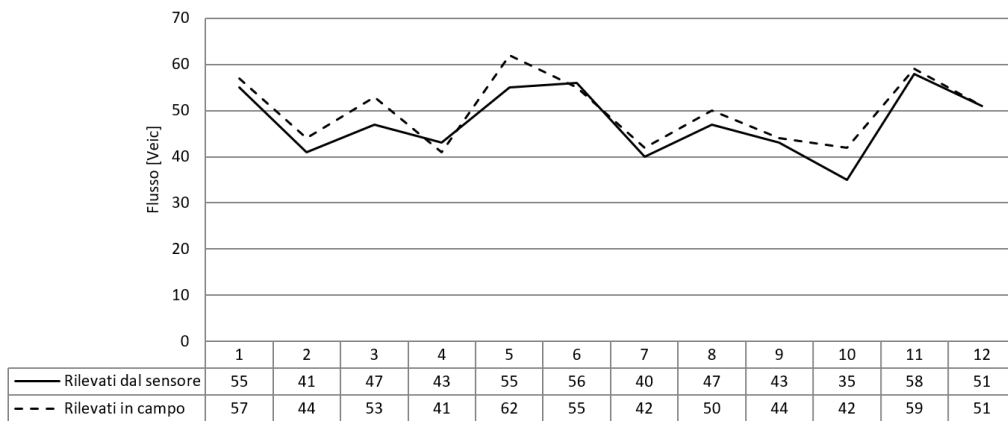


Figura 5.65 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14a-11/05/2015, 19:00-20:00

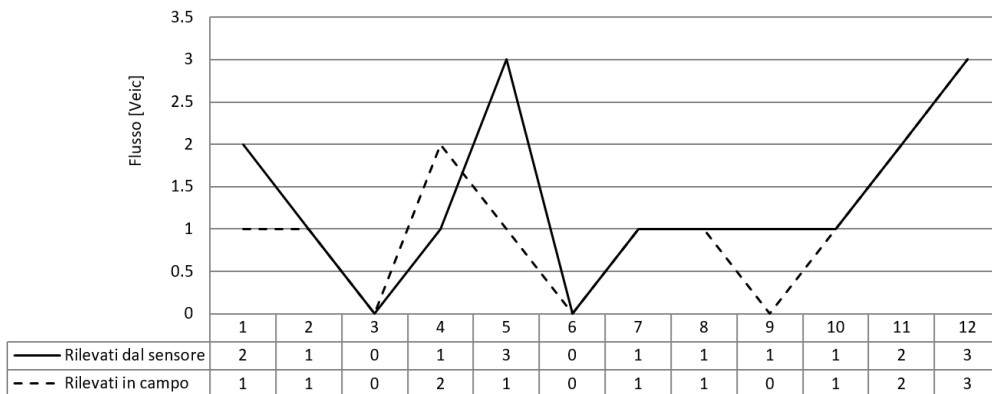


Figura 5.66 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min-MT14a-11/05/2015, 19:00-20:00

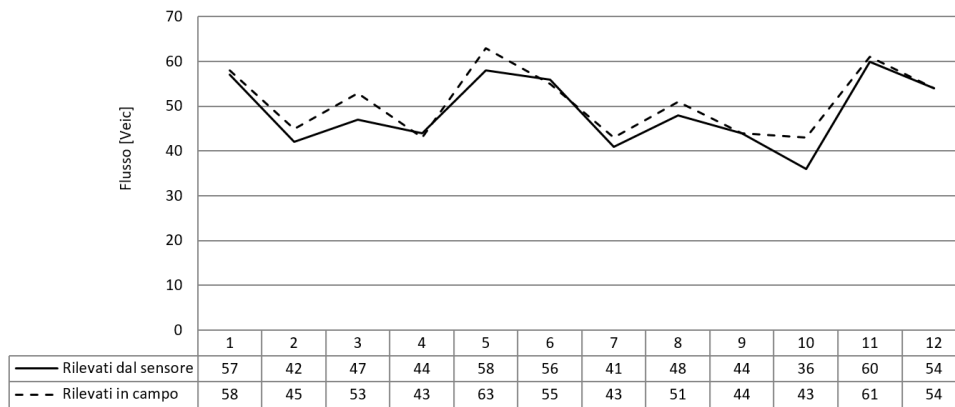


Figura 5.67 Veicoli totali rilevati nei 5 min.-MT14a-11/05/2015, 19:00-20:00

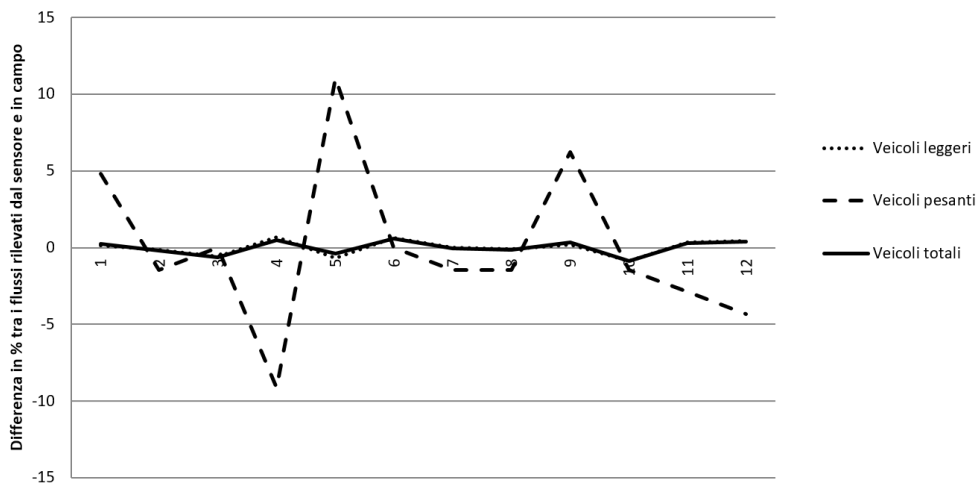


Figura 5.68 Analisi di affidabilità- MT14a-11/05/2015, 19:00-20:00

Tabella 5.6 Coefficienti – MT14a-11/05/2015, 19:00-20:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.156
	Veicoli pesanti	0.831
	Veicoli totali	0.160
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.146
	Veicoli pesanti	0.831
	Veicoli totali	0.144
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.842
	Veicoli pesanti	0.627
	Veicoli totali	0.861
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.997
	Veicoli pesanti	0.783
	Veicoli totali	0.997

**4. Sensore MT14a – giovedì 14/05/2015 – 8:00-9:00**

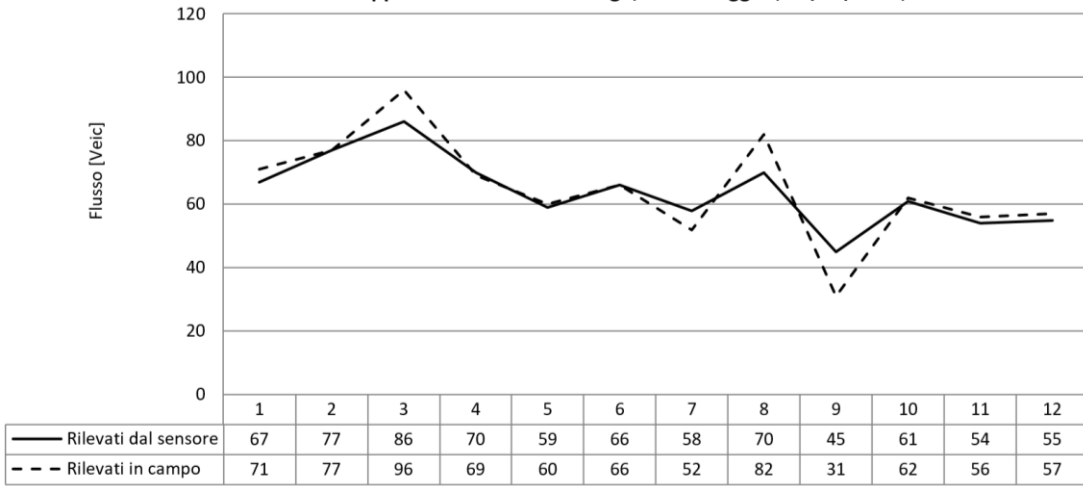


Figura 5.69 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14a-14/05/2015, 8:00-9:00

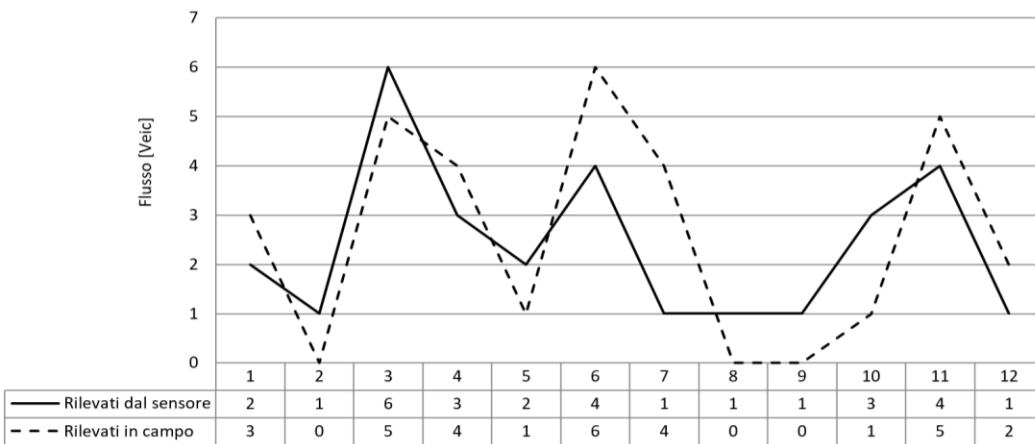


Figura 5.70 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min- MT14a-14/05/2015, 8:00-9:00

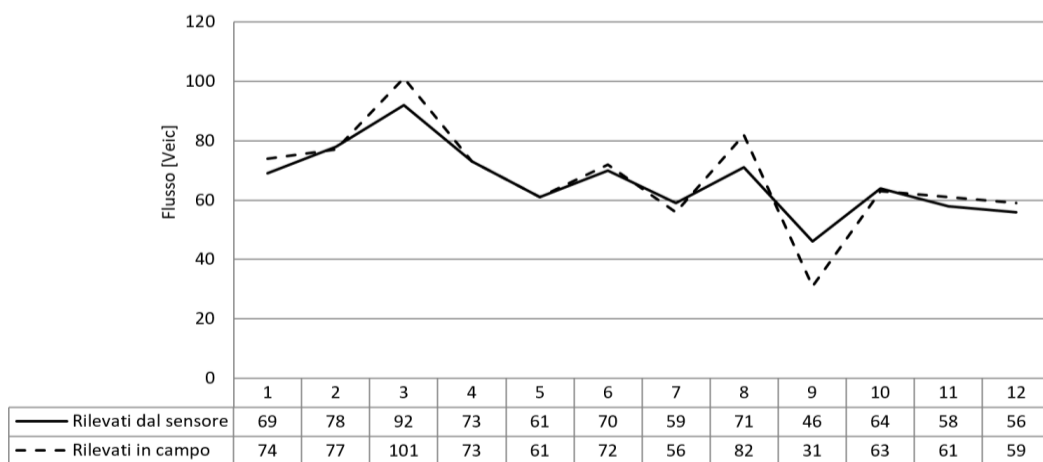


Figura 5.71 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-14/05/2015, 8:00-9:00

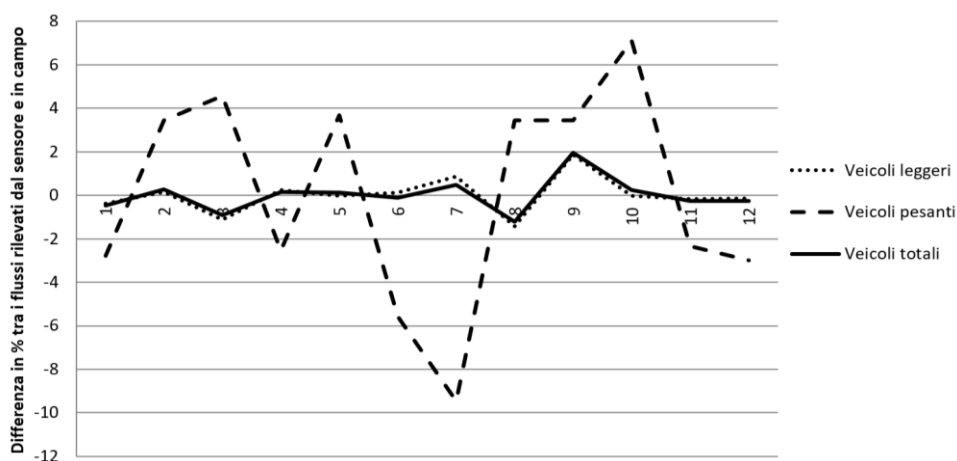


Figura 5.72 Analisi di affidabilità– MT14a-14/05/2015, 8:00-9:00

Tabella 5.7 Coefficienti – MT14a-14/05/2015, 8:00-9:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.173
	Veicoli pesanti	0.671
	Veicoli totali	0.179
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.252
	Veicoli pesanti	0.849
	Veicoli totali	0.251
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.874
	Veicoli pesanti	0.658
	Veicoli totali	0.877
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.991
	Veicoli pesanti	0.806
	Veicoli totali	0.992

### 5. Sensore MT14a – giovedì 14/05/2015 – 13:00-14:00

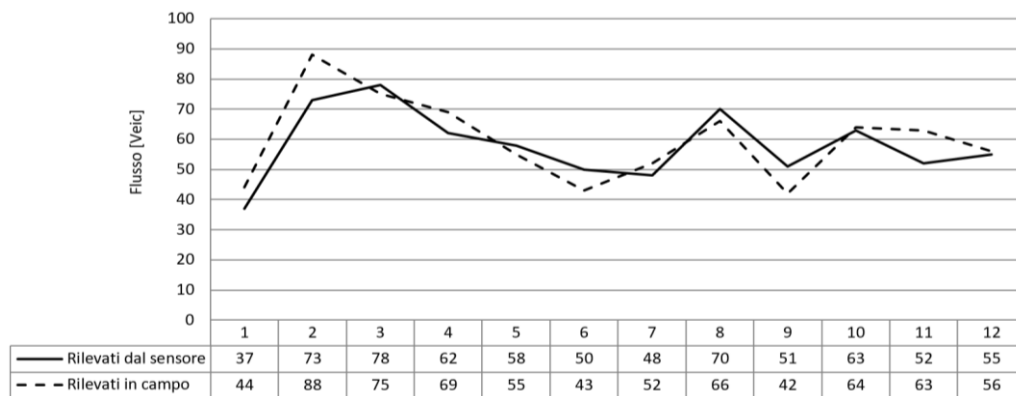


Figura 5.73 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14a-14/05/2015, 13:00-14:00

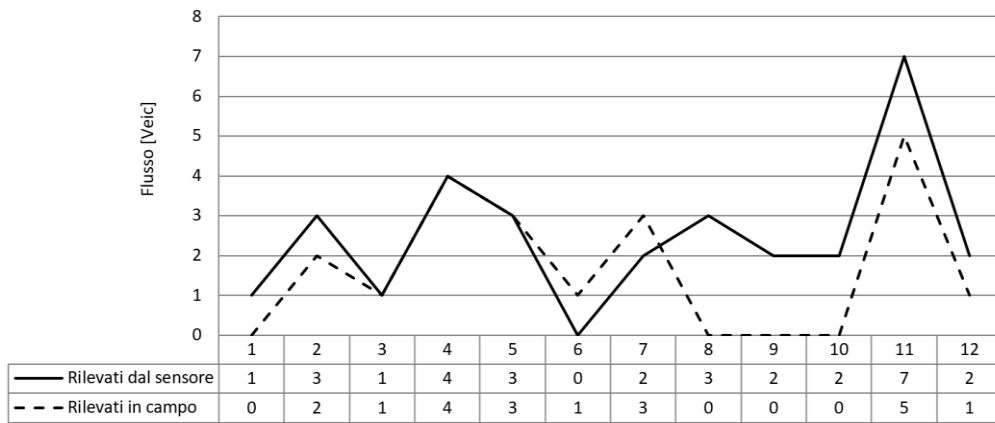


Figura 5.74 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min-MT14a-14/05/2015,13:00-14:00

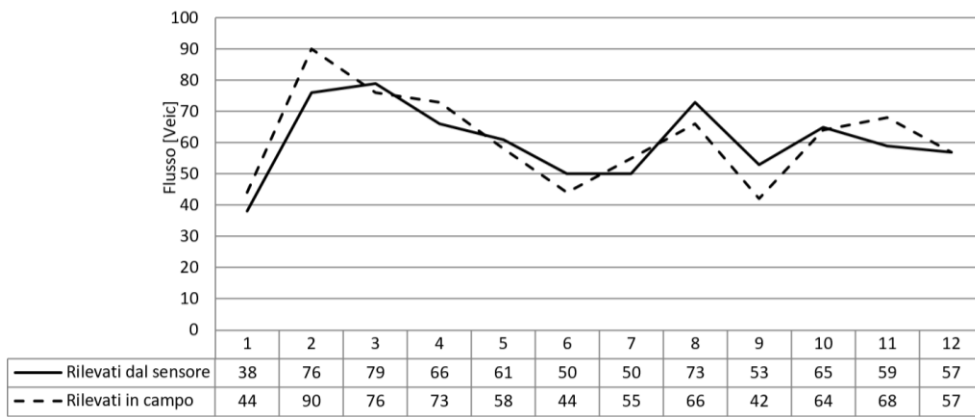


Figura 5.75 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-14/05/2015, 13:00-14:00

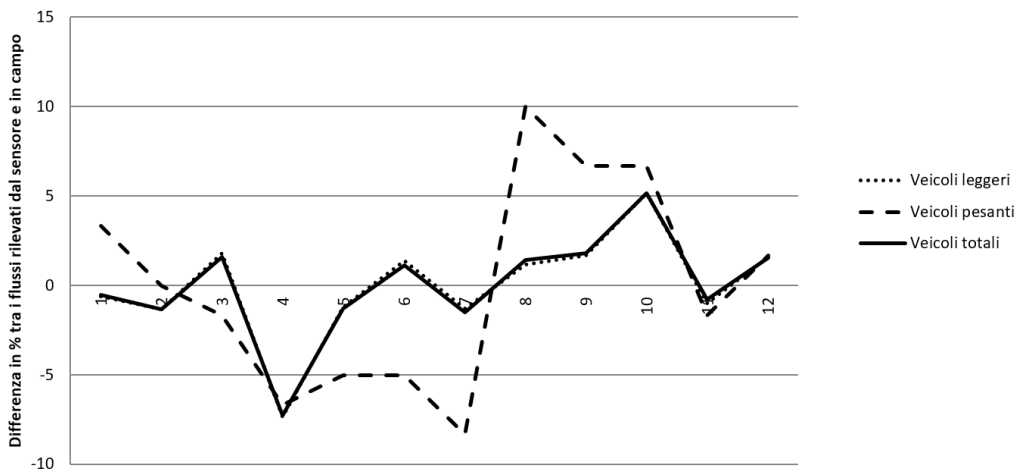


Figura 5.76 Analisi di affidabilità- MT14a-14/05/2015, 13:00-14:00

Tabella 5.8 Coefficienti – MT14a-14/05/2015, 13:00-14:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.202
	Veicoli pesanti	0.714
	Veicoli totali	0.198
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.233
	Veicoli pesanti	1.034
	Veicoli totali	0.235
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.778
	Veicoli pesanti	0.678
	Veicoli totali	0.787
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.987
	Veicoli pesanti	0.775
	Veicoli totali	0.987

### 6. Sensore MT14a – giovedì 14/05/2015 – 19:00-20:00

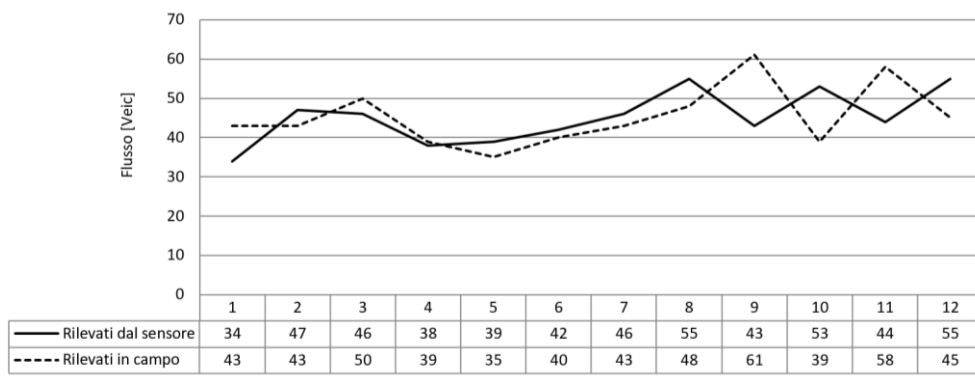


Figura 5.77 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14a-14/05/2015,19:00-20:00

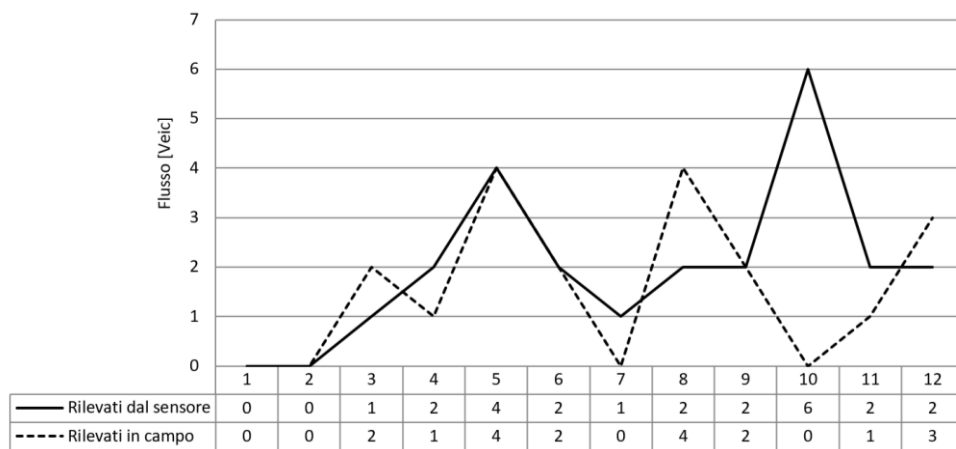


Figura 5.78 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-14/05/2015,19:00-20:00

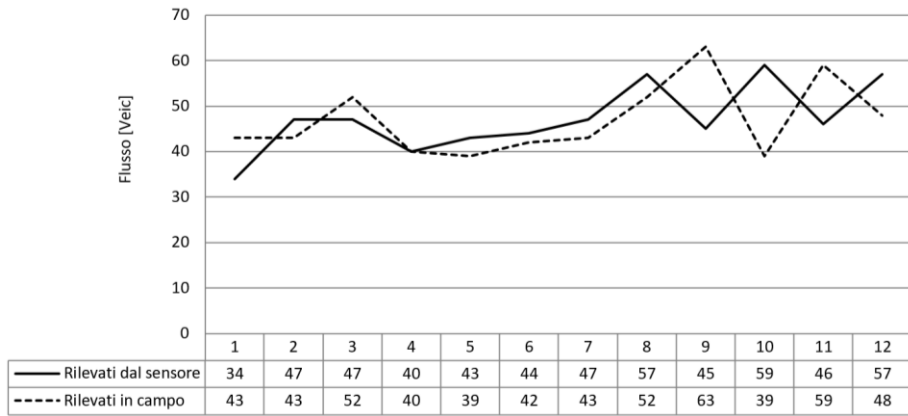


Figura 5.79 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-14/05/2015, 19:00-20:00

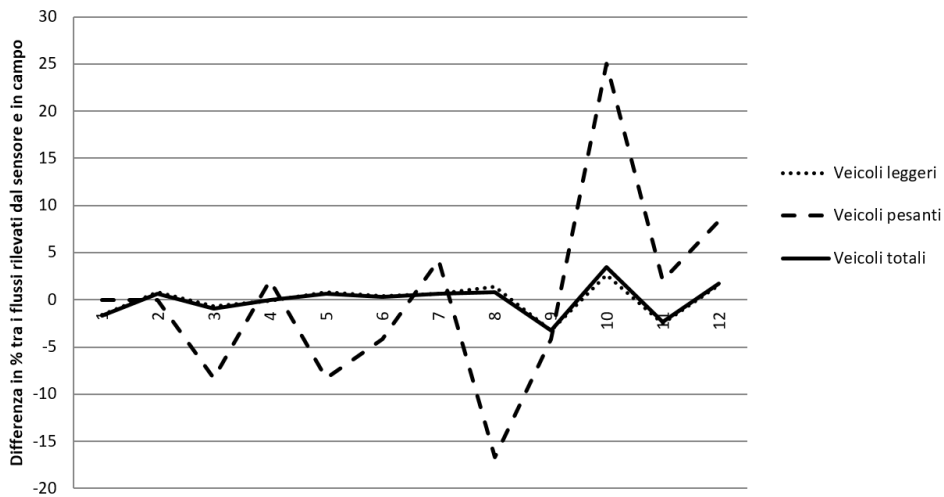


Figura 5.80 Analisi di affidabilità– MT14a-14/05/2015, 19:00-20:00

Tabella 5.9 Coefficienti – MT14a-14/05/2015, 19:00-20:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.148
	Veicoli pesanti	0.951
	Veicoli totali	0.155
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.172
	Veicoli pesanti	0.951
	Veicoli totali	0.170
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.119
	Veicoli pesanti	0.201
	Veicoli totali	0.097
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.960
	Veicoli pesanti	0.451
	Veicoli totali	0.958



**7. Sensore MT14a – lunedì 18/05/2015 – 8:00-9:00**

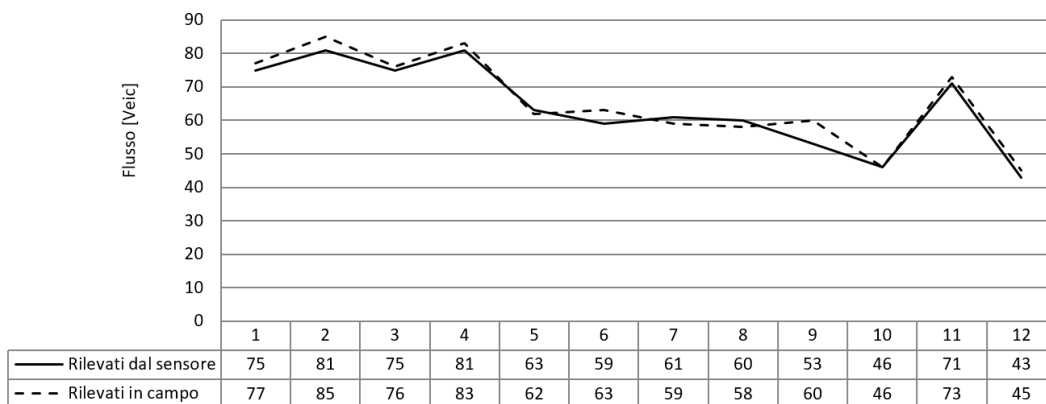


Figura 5.81 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14a-18/05/2015, 8:00-9:00

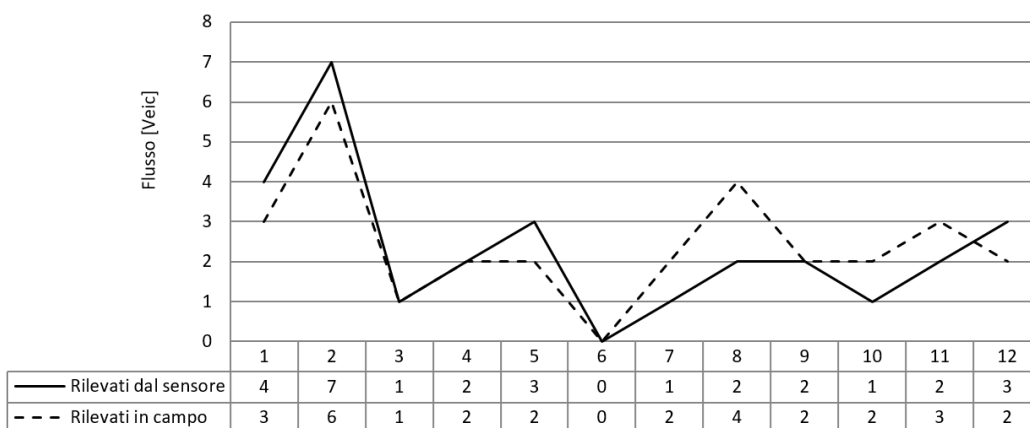


Figura 5.82 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-18/05/2015, 8:00-9:00

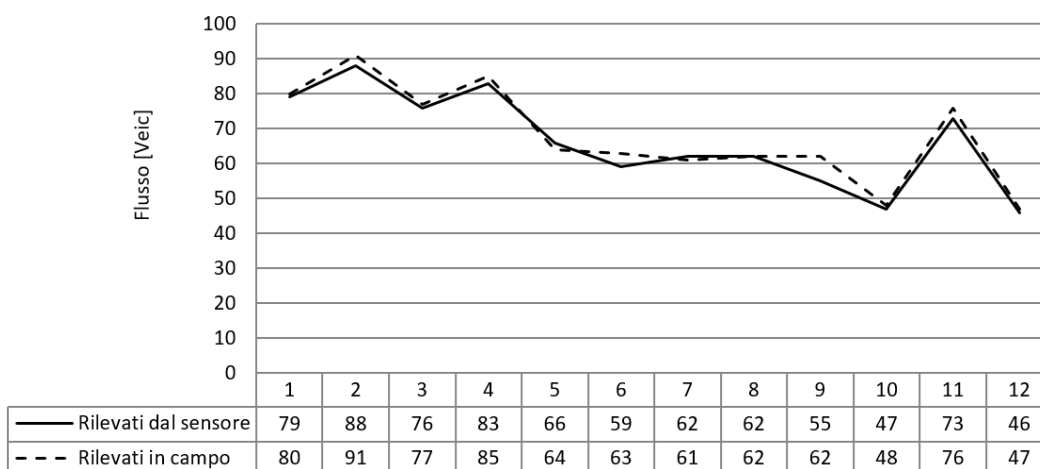


Figura 5.83 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-18/05/2015, 8:00-9:00

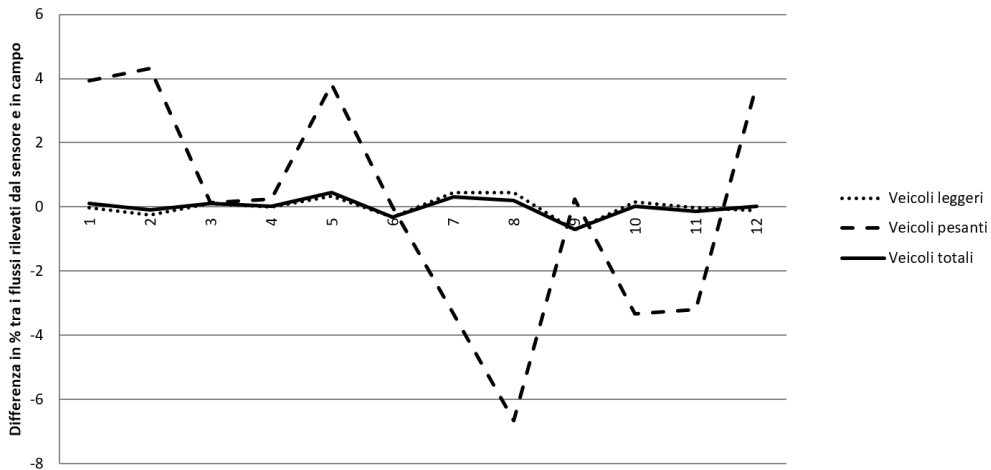


Figura 5.84 Analisi di affidabilità– MT14a-18/05/2015, 8:00-9:00

Tabella 5.10 Coefficienti – MT14a-18/05/2015, 8:00-9:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.200
	Veicoli pesanti	0.782
	Veicoli totali	0.206
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.202
	Veicoli pesanti	0.623
	Veicoli totali	0.204
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.898
	Veicoli pesanti	0.768
	Veicoli totali	0.903
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.999
	Veicoli pesanti	0.893
	Veicoli totali	0.999

### 8. Sensore MT14a – lunedì 18/05/2015 – 13:00-14:00

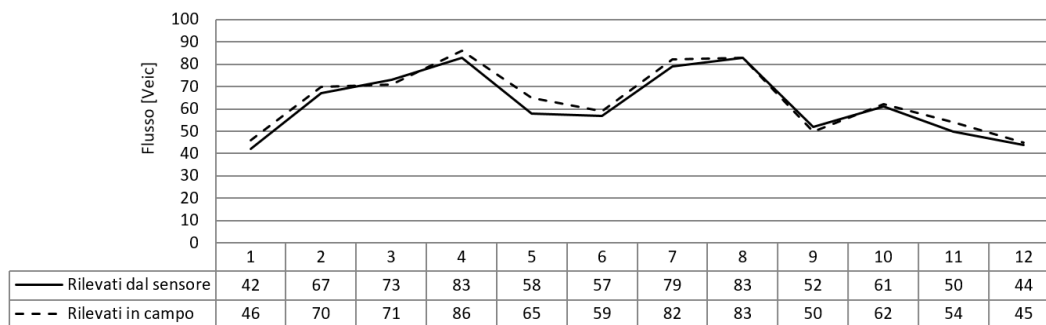


Figura 5.85 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14a-18/05/2015,13:00-14:00

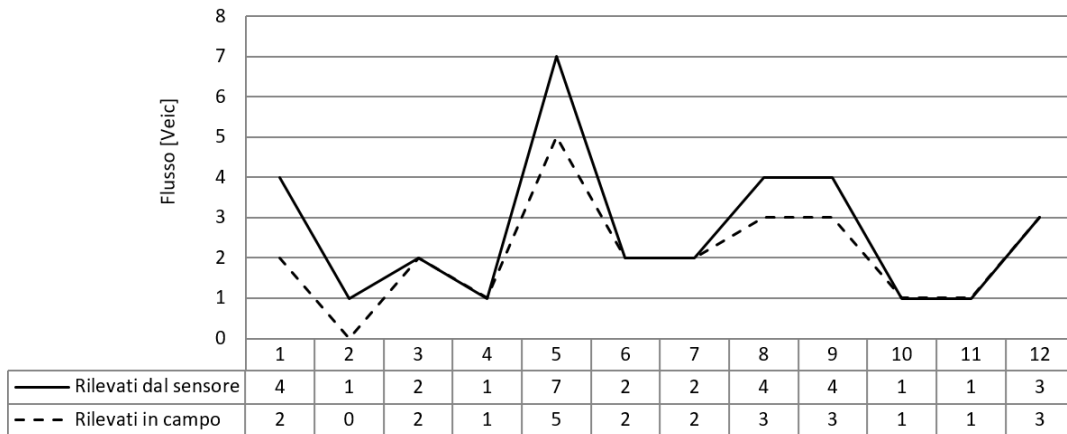


Figura 5.86 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min. MT14a-18/05/2015, 13:00-14:00

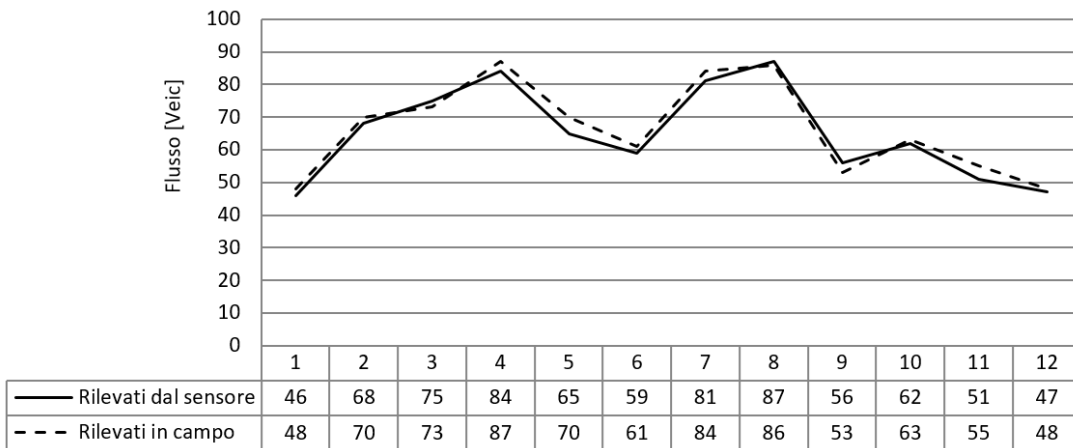


Figura 5.87 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-18/05/2015, 13:00-14:00

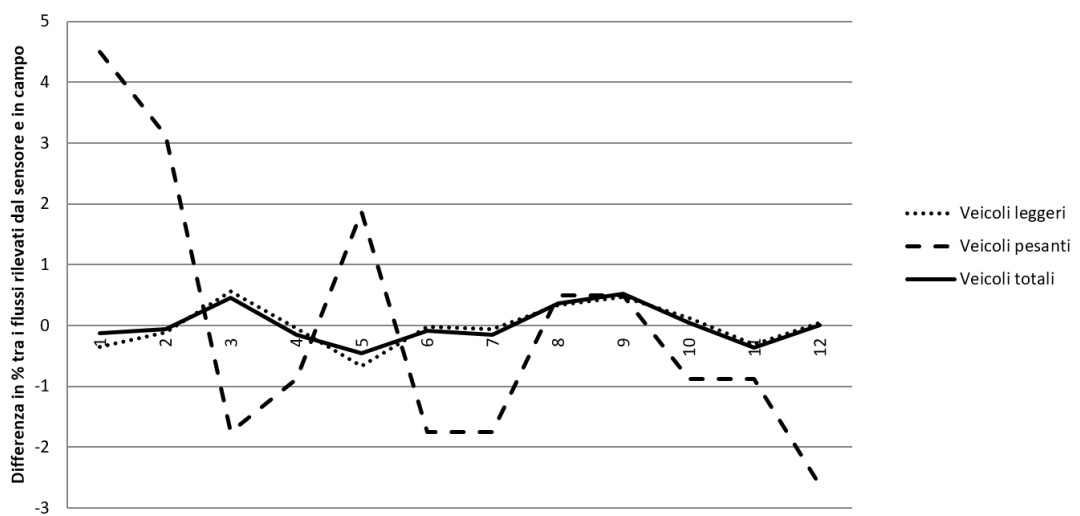


Figura 5.88 Analisi di affidabilità- MT14a-18/05/2015, 13:00-14:00

Tabella 5.11 Coefficienti – MT14a-18/05/2015, 13:00-14:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.233
	Veicoli pesanti	0.685
	Veicoli totali	0.218
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.223
	Veicoli pesanti	0.629
	Veicoli totali	0.213
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.902
	Veicoli pesanti	0.847
	Veicoli totali	0.904
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.998
	Veicoli pesanti	0.956
	Veicoli totali	0.999

**9. Sensore MT14a – lunedì 18/05/2015 – 19:00-20:00**

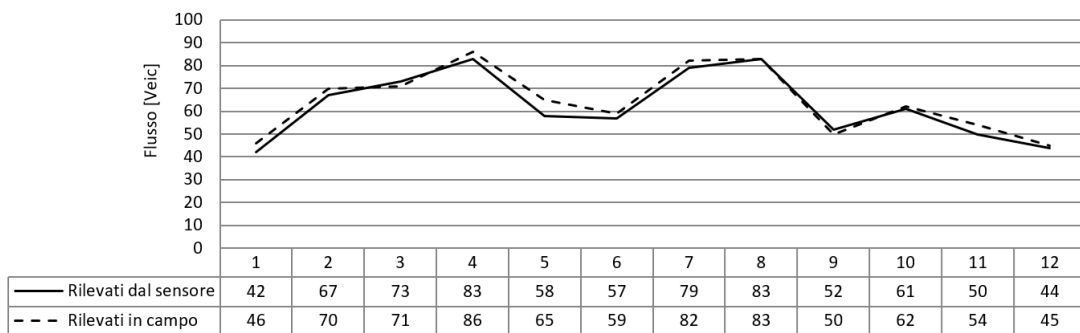


Figura 5.89 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14a-18/05/2015,19:00-20:00

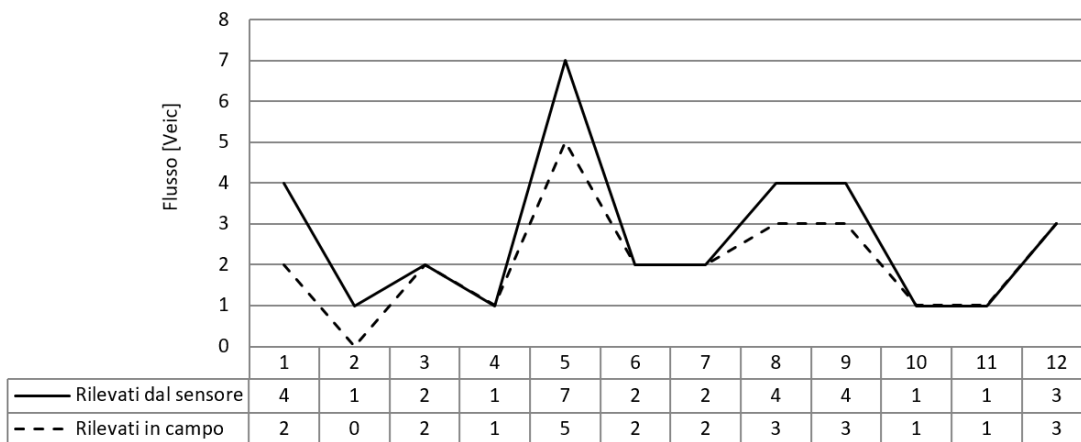


Figura 5.90 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-18/05/2015,19:00-20:00

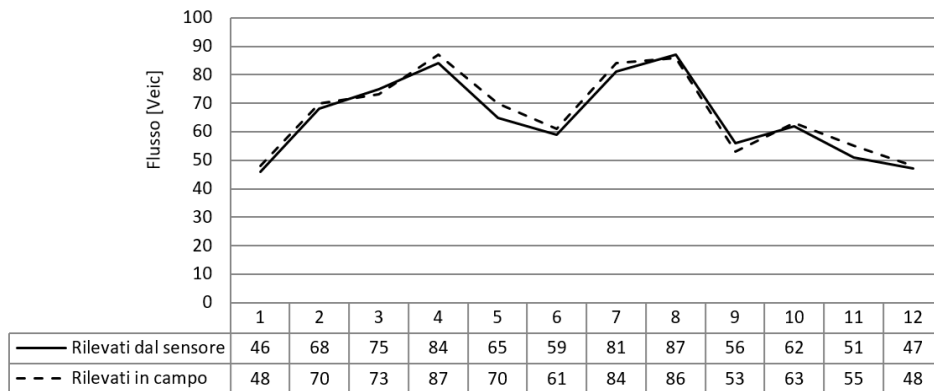


Figura 5.91 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-18/05/2015, 19:00-20:00

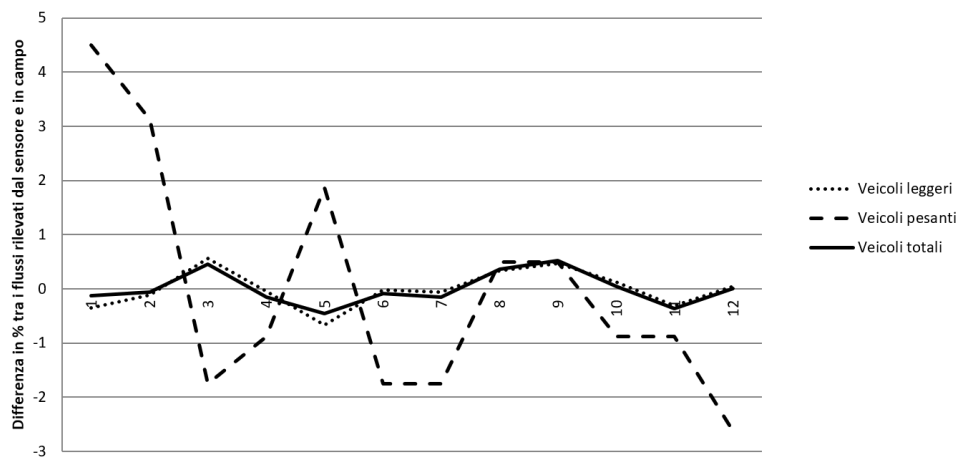


Figura 5.92 Analisi di affidabilità– MT14a-18/05/2015, 19:00-20:00

Tabella 5.12 Coefficienti – MT14a-18/05/2015, 19:00-20:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.146
	Veicoli pesanti	0.603
	Veicoli totali	0.134
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.133
	Veicoli pesanti	0.603
	Veicoli totali	0.126
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.852
	Veicoli pesanti	0.772
	Veicoli totali	0.841
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.997
	Veicoli pesanti	0.917
	Veicoli totali	0.997

**10. Sensore MT14a – giovedì 21/05/2015 – 8:00-9:00**

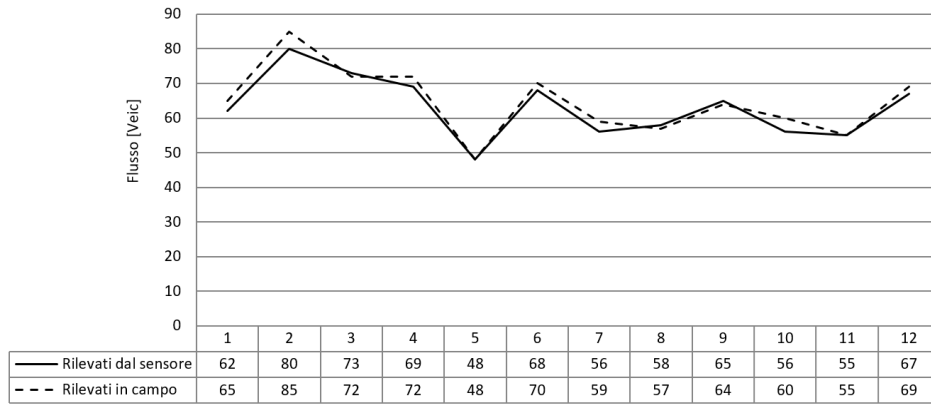


Figura 5.93 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14a-21/05/2015,8:00-9:00

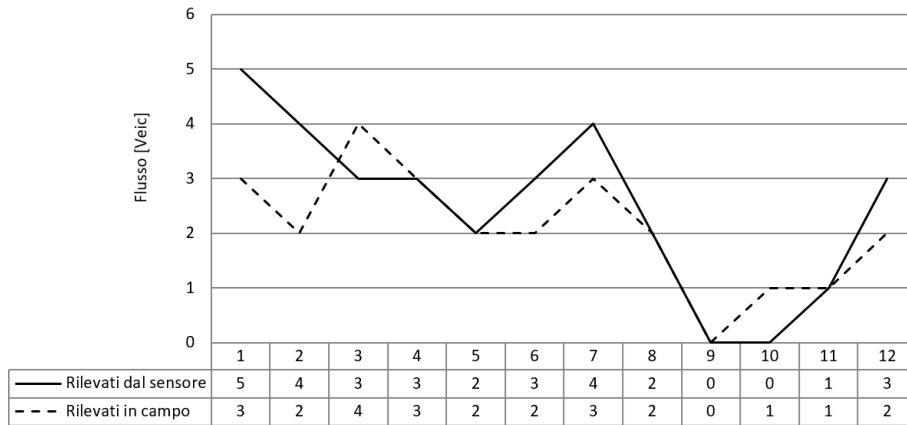


Figura 5.94 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-21/05/2015, 8:00-9:00

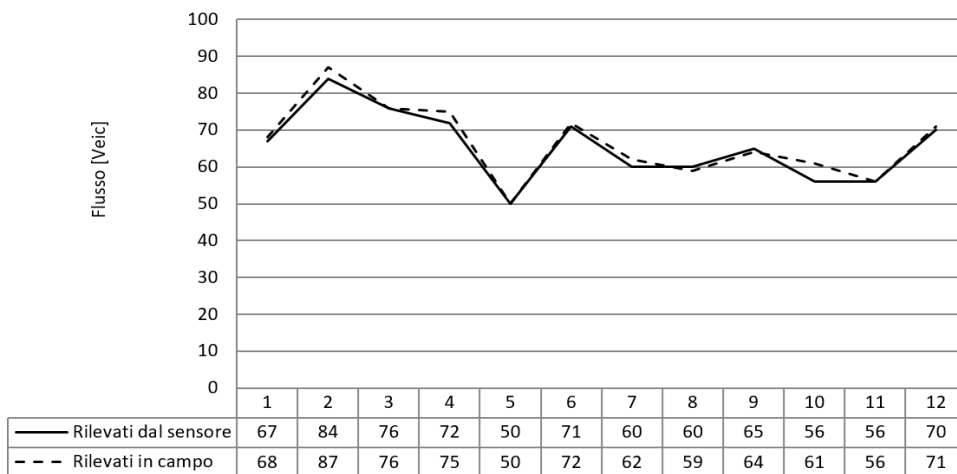


Figura 5.95 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-21/05/2015, 8:00-9:00

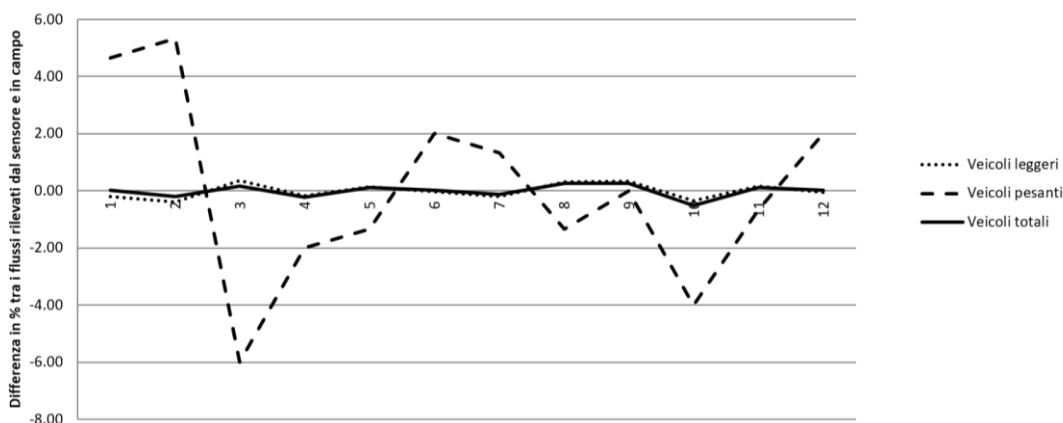


Figura 5.96 Analisi di affidabilità– MT14a-21/05/2015, 8:00-9:00

Tabella 5.13 Coefficienti – MT14a-21/05/2015, 8:00-9:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.142
	Veicoli pesanti	0.627
	Veicoli totali	0.147
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.151
	Veicoli pesanti	0.520
	Veicoli totali	0.152
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.897
	Veicoli pesanti	0.712
	Veicoli totali	0.903
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.999
	Veicoli pesanti	0.894
	Veicoli totali	0.999

### 11. Sensore MT14a – giovedì 21/05/2015 – 13:00-14:00

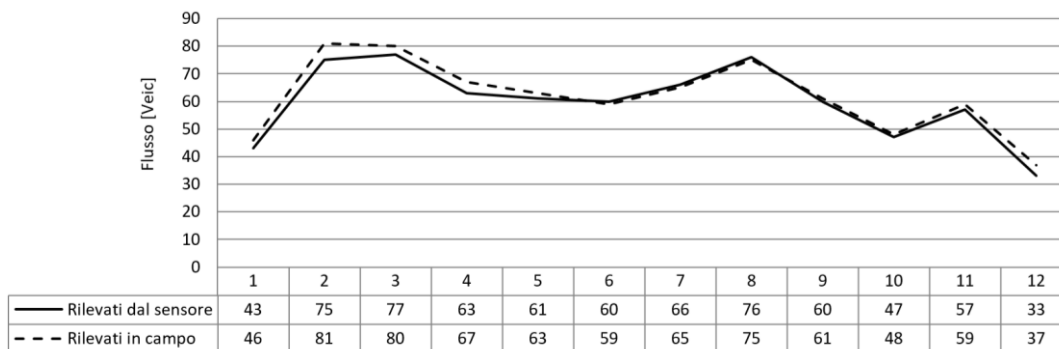


Figura 5.97 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14a-21/05/2015,13:00-14:00

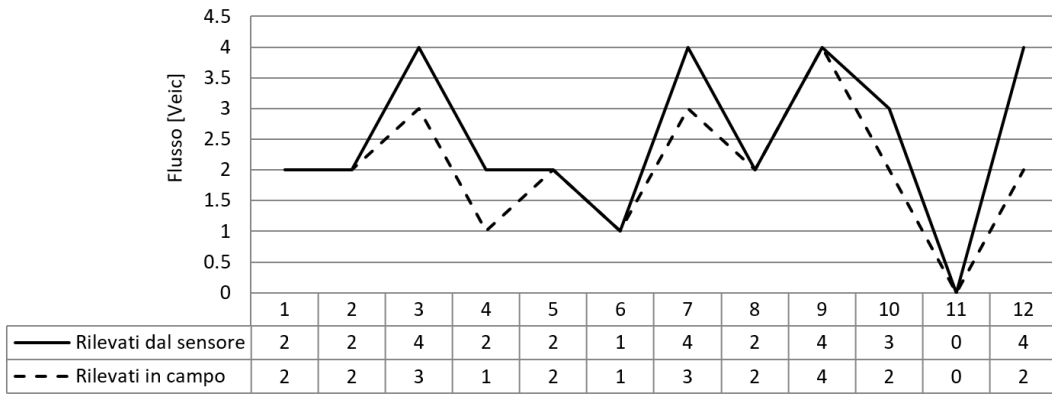


Figura 5.98 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-21/05/2015, 13:00-14:00

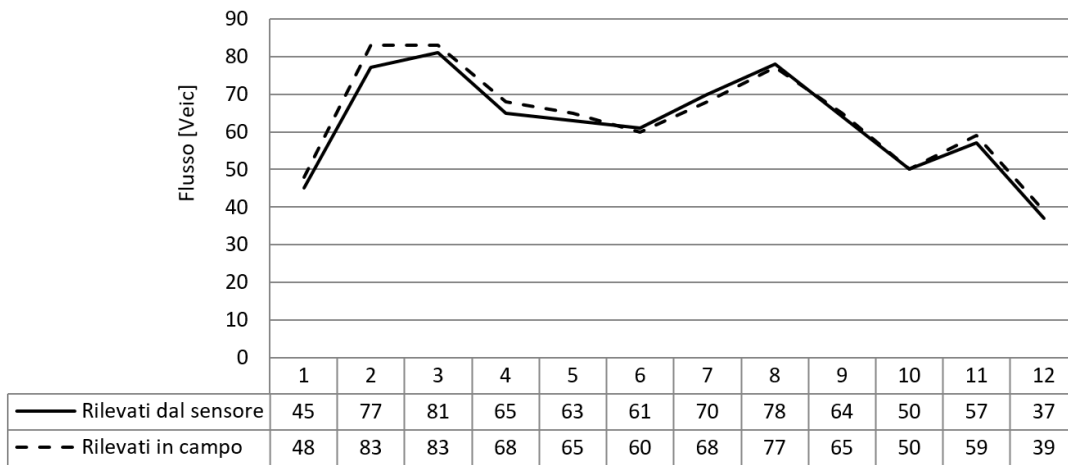


Figura 5.99 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-21/05/2015, 13:00-14:00

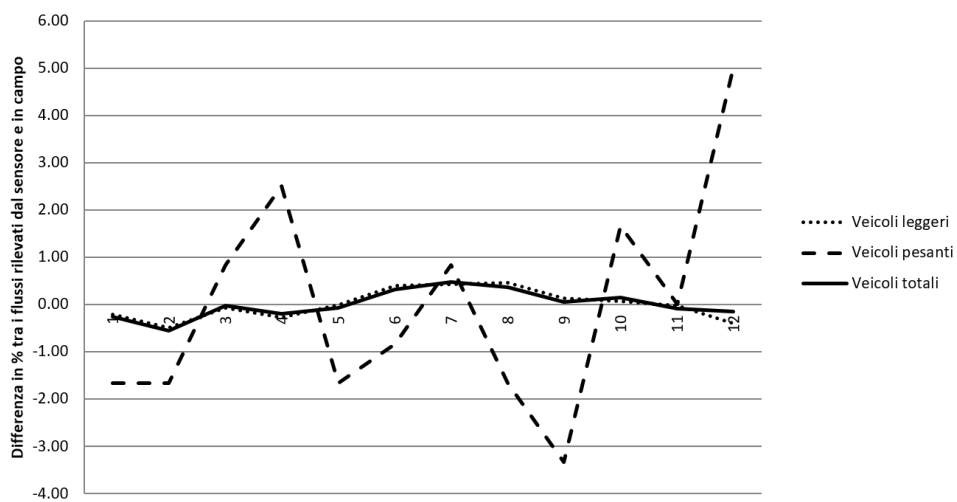


Figura 5.100 Analisi di affidabilità- MT14a-21/05/2015, 13:00-14:00



Tabella 5.14 Coefficienti – MT14a-21/05/2015, 13:00-14:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.226
	Veicoli pesanti	0.526
	Veicoli totali	0.216
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.218
	Veicoli pesanti	0.522
	Veicoli totali	0.214
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.904
	Veicoli pesanti	0.789
	Veicoli totali	0.905
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.999
	Veicoli pesanti	0.945
	Veicoli totali	0.999

**12. Sensore MT14a – giovedì 21/05/2015 – 19:00-20:00**

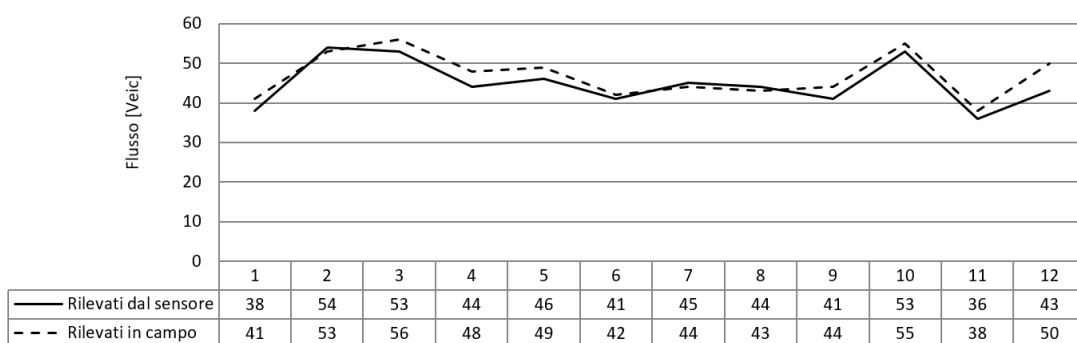


Figura 5.101 Veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14a-21/05/2015,19:00-20:00

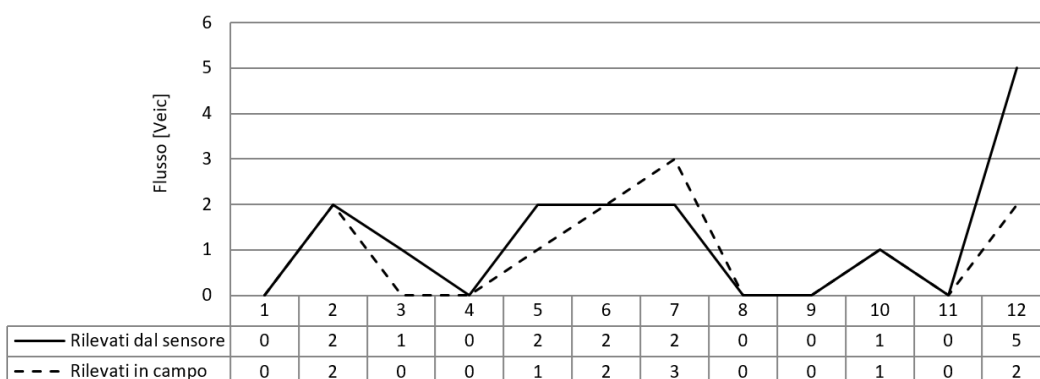


Figura 5.102 Veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14a-21/05/2015,19:00-20:00

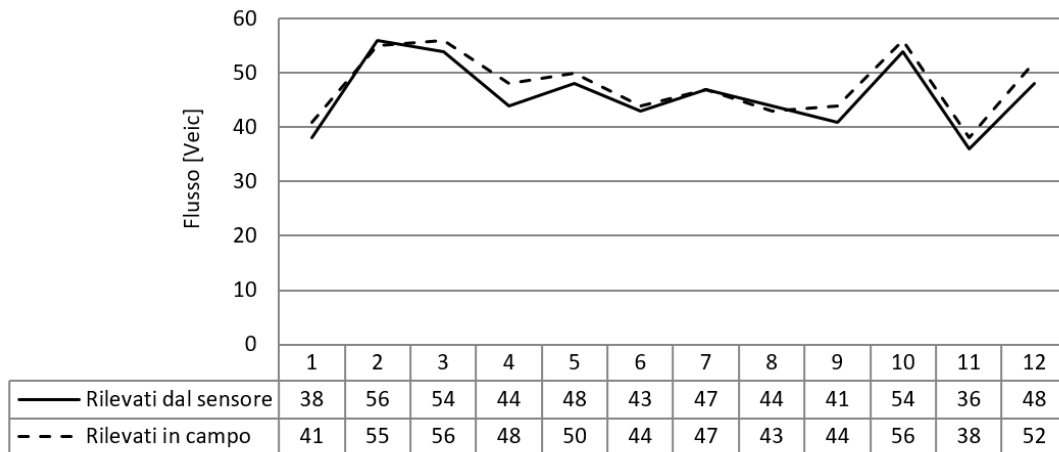


Figura 5.103 Veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14a-21/05/2015, 19:00-20:00

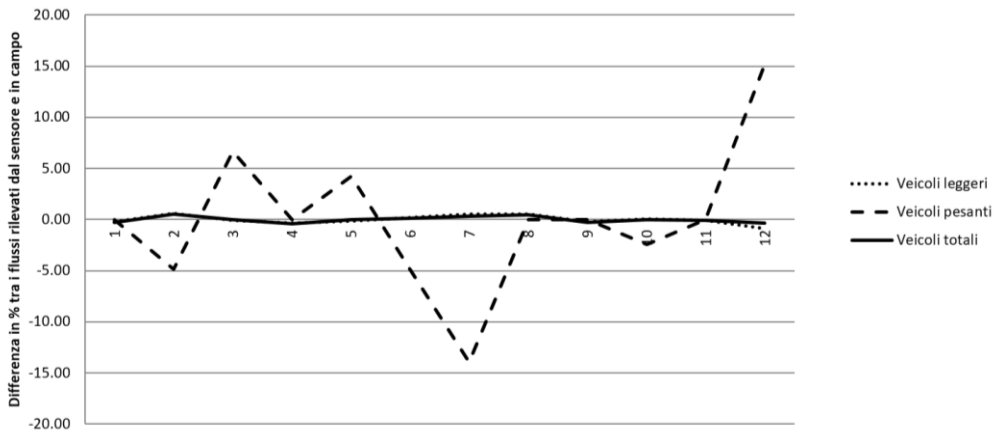


Figura 5.104 Analisi di affidabilità– MT14a-21/05/2015, 19:00-20:00

Tabella 5.15 Coefficienti – MT14a-21/05/2015, 19:00-20:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.131
	Veicoli pesanti	1.182
	Veicoli totali	0.138
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.124
	Veicoli pesanti	1.182
	Veicoli totali	0.127
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.842
	Veicoli pesanti	0.686
	Veicoli totali	0.883
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.998
	Veicoli pesanti	0.737
	Veicoli totali	0.999

## 5.9.2 Analisi dei flussi stimati dal modello

Quest'analisi è stata effettuata mettendo a sistema i dati rilevati in campo e i dati di flusso stimati dal modello associato al software OPTIMA.

La scelta delle sezioni di rilievo è stata compiuta in modo tale da esaminare un ampio insieme di configurazioni possibili. Nello specifico, sono state scelte sezioni con le seguenti caratteristiche:

- con una o due corsia per senso di marcia;
- con e senza spartitraffico centrale;
- caratterizzate da flussi di moderata o elevata entità;
- a scorrimento sia lento che veloce;
- distanti o in corrispondenza di alcune postazioni di rilievo automatico.

Le sezioni individuate nell'area di studio risultano essere le seguenti:

- Mod. 1 – Via Francesco Fusco (Figura 5.105);
- Mod. 2 – Viale Vittorio Veneto-Corso Italia (Figura 5.106);
- Mod. 3 – Parco Gioeni (Figura 5.107);
- Mod. 4 – Librino (non analizzata);
- Mod. 5 – Via Antonino di Sanguiliano (Figura 5.108);
- Mod. 6 – Via Carlo Forlanini (Figura 5.109);
- Mod. 7 – Viale Mario Rapisardi (Figura 5.110);
- Mod. 8 – Via Caronda (Figura 5.111);
- Mod. 9 – Via Vincenzo Giuffrida (Figura 5.112);
- Mod. 10 – Via Vittorio Emanuele Orlando (Figura 5.113);
- Mod. 11 – Viale Africa (Figura 5.114).

A seguire sono rappresentate l'ubicazione di tali sezioni e la specifica del codice identificativo degli archi ai quali si fa riferimento per i dati stimati dal modello.



Figura 5.105 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 1 – Via Francesco Fusco

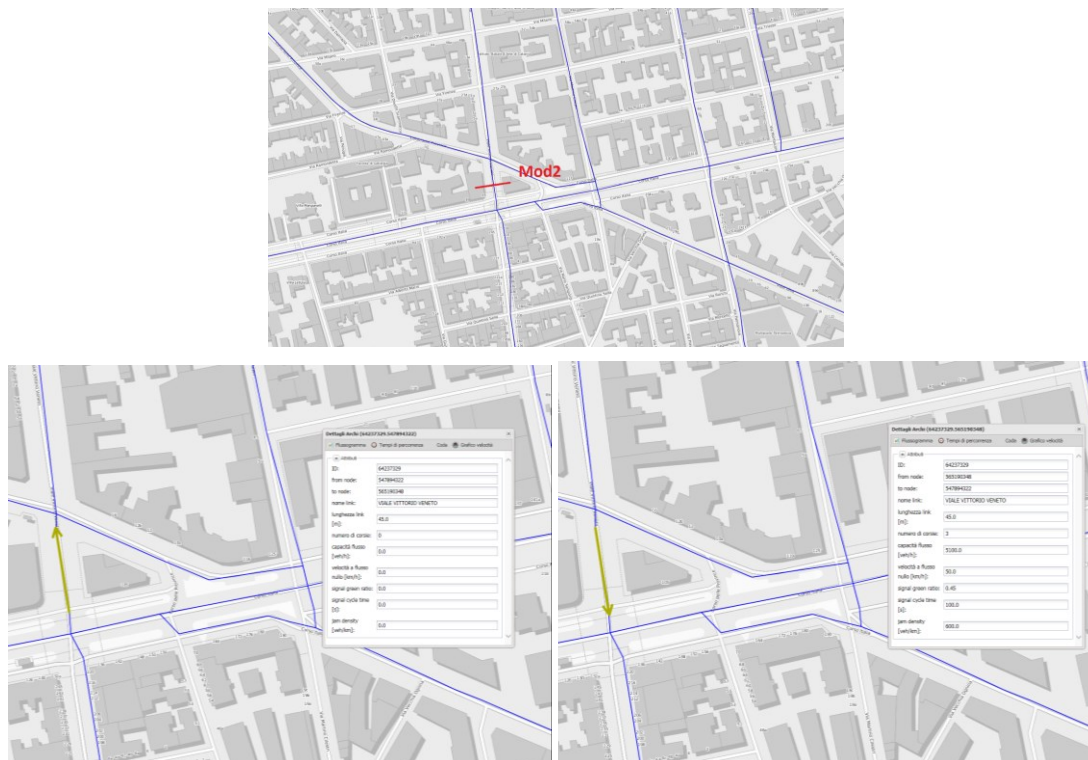


Figura 5.106 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 2–Viale V. Veneto-C. Italia



Figura 5.107 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 3 – Parco Gioeni



Figura 5.108 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 5 – Via A. di Sangiuliano

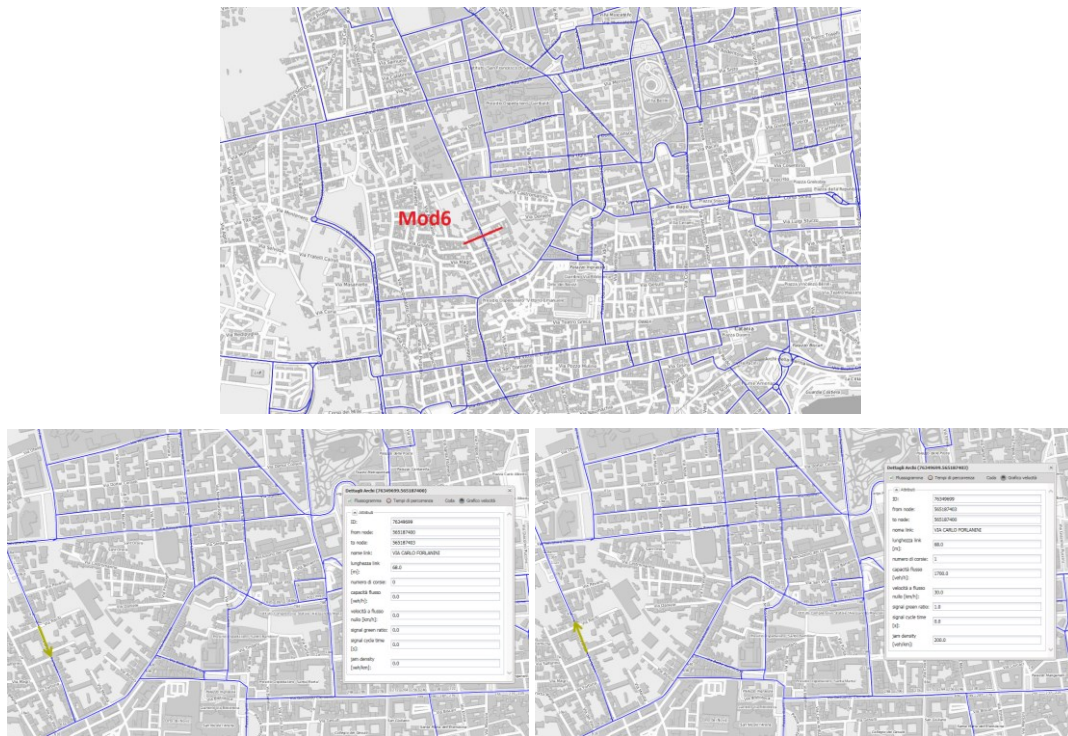


Figura 5.109 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 6 – Via Carlo Forlanini



Figura 5.110 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 7 – Viale Mario Rapisardi



Figura 5.111 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 8 – Via Caronda



Figura 5.112 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 9 – Via Vincenzo Giuffrida



Figura 5.113 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 10–Via V. E. Orlando

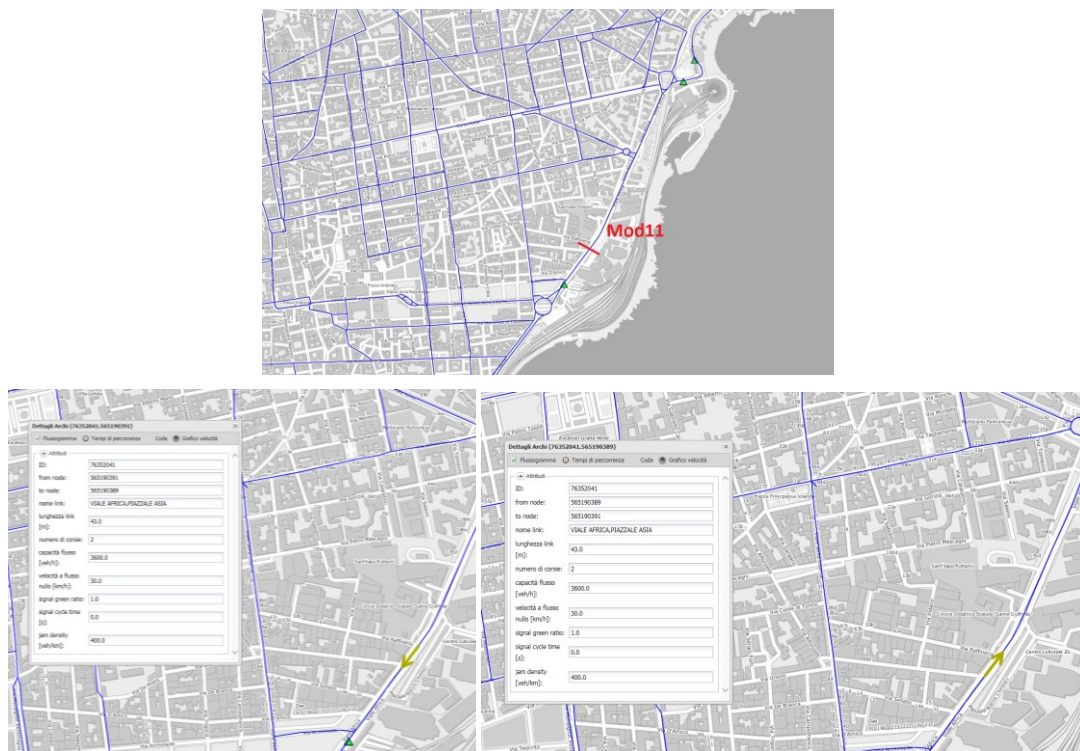


Figura 5.114 Localizzazione e specifica ID sezione Mod. 11 – Viale Africa



L'esecuzione e la durata dei rilievi sul campo è stata eseguita analogamente a quanto fatto per la precedente analisi, con la sola differenza che non sono state identificate, in questo caso, le classi veicolari, bensì si è fatto riferimento ad un unico valore di flusso equivalente.

Le analisi ed il confronto dei dati sono stati effettuati con aggregazioni al quarto d'ora in quanto la durata di una singola simulazione è proprio pari 15 minuti e le stime di traffico sono restituite dal software ad intervalli pari a questo valore. Pertanto, nelle formulazioni utilizzate il numero  $n$  di intervalli considerati all'interno di una fascia oraria è posto pari a 4, e dunque i dati rilevati dall'operatore in campo sono stati aggregati in  $\Delta t$  pari a 15 minuti.

A seguire, a titolo esemplificativo, si riportano i risultati ottenuti per una delle sezioni analizzate.

### **SEZIONE ANALIZZATA**

Tra le 11 sezioni oggetto di analisi, la sezione considerata ai fini della produzione dei risultati ottenuti e riportati qui di seguito è la sezione Mod11 situata in Viale Africa (Figura 5.114).

Tale sezione è caratterizzata da:

- 2 carreggiate separate da uno spartitraffico centrale;
- 2 corsie per senso di marcia.
- 1 sezione di monitoraggio automatico posta accanto.

L'arco a cui fa riferimento tale sezione ha il seguente codice identificativo ID-76352041 ed è compreso tra i nodi con ID-565190389 e ID-565190391, utilizzati per distinguere i due sensi di marcia analizzati.

### **DATI RILEVATI**

Ai fini della rilevazione dei dati, la sezione *Mod11* è considerata formata da (Figura 5.115):

- *Arco 1*, quell'arco che ha inizio nel nodo 565190391 e finisce nel nodo 565190389, caratterizzato da flussi provenienti da Piazza Galatea e diretti verso Piazza Papa Giovanni XXIII (direzione Sud);
- *Arco 2*, quell'arco che ha inizio nel nodo 565190389 e finisce nel nodo 565190391, caratterizzato da flussi provenienti da Piazza Papa Giovanni XXIII e diretti verso Piazza Galatea (direzione Nord).

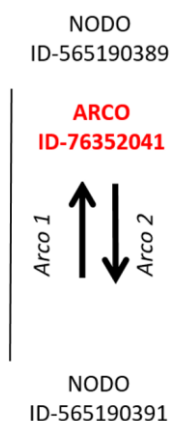


Figura 5.115 Schema ID arco e ID nodo sezione MOD11 – Viale Africa

I rilevamenti sono stati effettuati, come stabilito precedentemente, durante le seguenti fasce orarie 8:00-9:00, 13:00-14:00 e 19:00-20:00 e nei giorni di lunedì e giovedì.

**ELABORAZIONI EFFETTUATE**

**13. Sensore MOD11, Arco 1 – giovedì 4/06/2015 – 8:00-9:00, 13:00-14:00, 19:00-20:00**

L'andamento del flusso veicolare stimato dal software e quello rilevato in campo ogni quarto d'ora nelle tre fasce orarie analizzate sono riportati di seguito in Tabella 5.16, Tabella 5.17 e

Tabella 5.18, e rappresentati graficamente in Figura 5.116, Figura 5.117 e Figura 5.118.

Tabella 5.16 Flusso rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 8:00-9:00

Data	Ora	Veicoli STIMATI del quarto d'ora	Veicoli RILEVATI del quarto d'ora
04/06/2015	8:00-8:15	181.494	221
04/06/2015	8:15-8:30	184.164	263
04/06/2015	8:30-8:45	207.783	215
04/06/2015	8:45-9:00	257.561	302

Tabella 5.17 Flusso rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 13:00-14:00

Data	Ora	Veicoli STIMATI del quarto d'ora	Veicoli RILEVATI del quarto d'ora
04/06/2015	13:00-13:15	226.185	359
04/06/2015	13:15-13:30	222.588	261
04/06/2015	13:30-13:45	217.830	292
04/06/2015	13:45-14:00	210.859	280

Tabella 5.18 Flusso rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 19:00-20:00

Data	Ora	Veicoli STIMATI del quarto d'ora	Veicoli RILEVATI del quarto d'ora
04/06/2015	19:00-19:15	244.889	310
04/06/2015	19:15-19:30	242.673	325
04/06/2015	19:30-19:45	240.766	285
04/06/2015	19:45-20:00	237.012	283

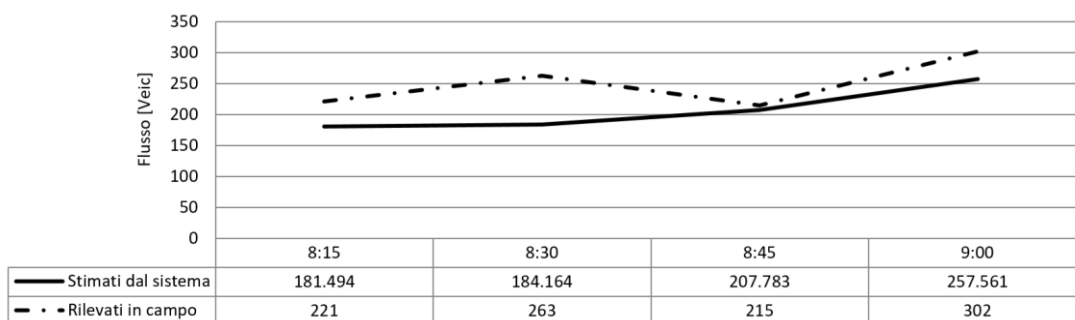


Figura 5.116 Andamento flusso veicolare – MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 8:00-9:00

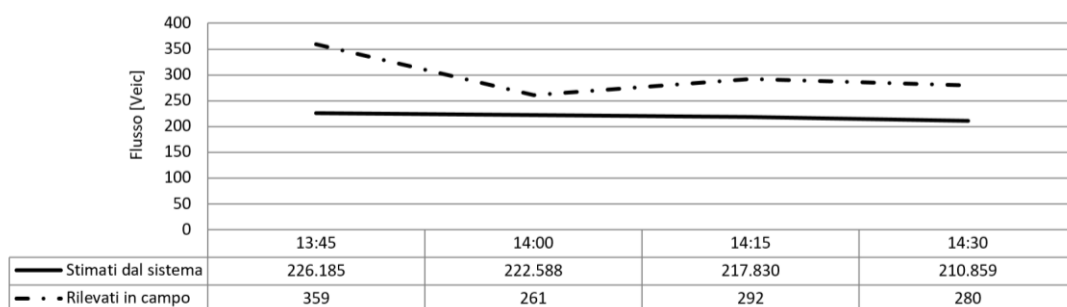


Figura 5.117 Andamento flusso veicolare–MOD11, Arco 1–4/06/2015, 13:00-14:00

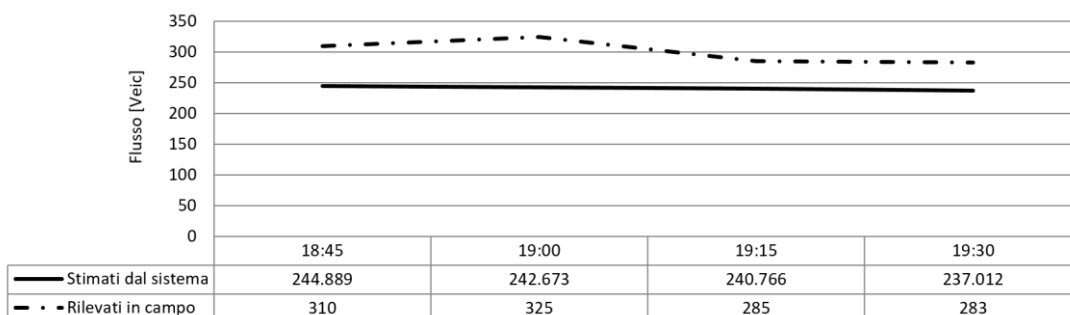


Figura 5.118 Andamento flusso veicolare–MOD11, Arco 1–4/06/2015, 19:00-20:00

Dai grafici precedenti, si osserva che il modello di simulazione è in grado di riprodurre valori di flussi di traffico abbastanza vicini a quelli che realmente transitano sulla rete,

nonostante le fasce orarie considerate siano quelle in corrispondenza delle ore di punta, e quindi soggette, possibilmente, alla formazione di code di veicoli e al fenomeno della congestione. Si nota, tuttavia, che la curva rappresentante i dati stimati dal software risulta trovarsi al di sotto di quella dei flussi rilevati sul campo: questo indica che il modello, in alcuni casi, sottostima leggermente i valori dei flussi. Tale scostamento, viene in parte corretto mediante l'importazione dei dati rilevati tramite il monitoraggio automatico e dei floating car data, che operano rispettivamente una variazione del valore del flusso uscente in corrispondenza dell'arco nel quale sono installati i rilevatori, una propagazione di questi dati sugli archi a monte e a valle e una correzione dei valori di velocità.

In seguito, effettuando l'analisi di affidabilità dei flussi di traffico, sono stati ottenuti i risultati riportati di seguito, in Figura 5.119, Figura 5.120 e Figura 5.121.

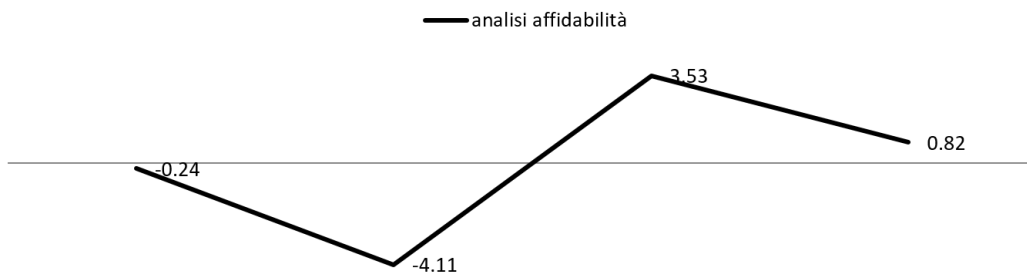


Figura 5.119 Analisi di affidabilità dei flussi–MOD11, Arco 1–4/06/15, 8:00-9:00

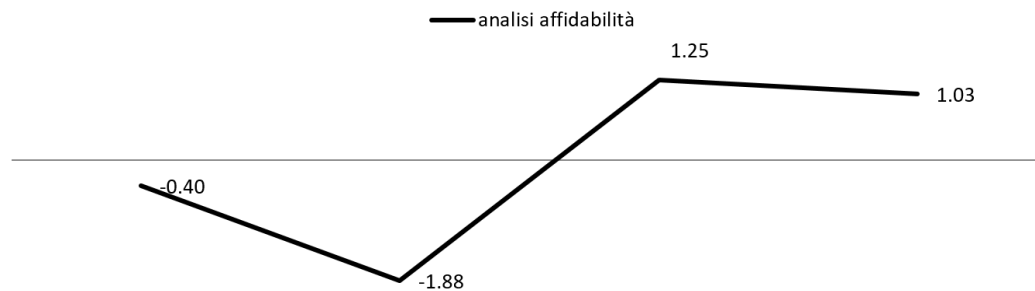


Figura 5.120 Analisi di affidabilità dei flussi–MOD11, Arco 1–4/06/15, 13:00-14:00

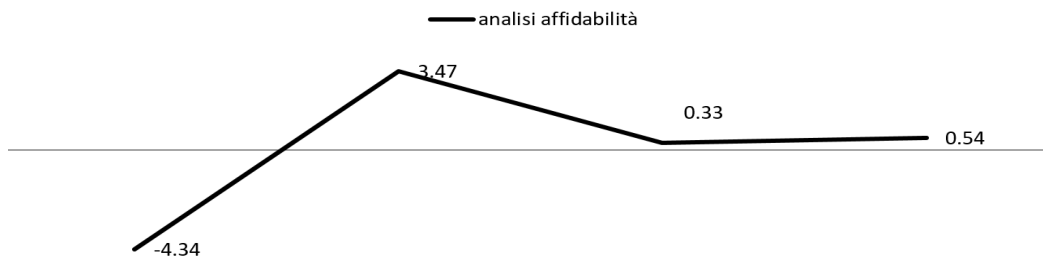


Figura 5.121 Analisi di affidabilità dei flussi–MOD11, Arco 1–4/06/15, 19:00-20:00

Questi grafici mostrano, per i 4 intervalli di tempo considerati all'interno della fascia oraria di analisi, i valori delle differenze tra la percentuale di flusso orario stimato dal modello durante una simulazione, e cioè per una durata pari a 15 minuti, e la percentuale di flusso orario rilevato in campo dall'operatore, riferita sempre allo stesso intervallo. Per tutte e tre le fasce orarie sono stati ottenuti dei valori simili: la curva di affidabilità presenta degli scostamenti dall'andamento orizzontale poco rilevanti, ciò a significare un buon funzionamento del modello di assegnazione.

Infine, la Tabella 5.19, la Tabella 5.20 e la Tabella 5.21 riassumono i valori ottenuti per il coefficiente di variazione, il coefficiente di correlazione e quello di determinazione.

Tabella 5.19 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 8:00-9:00

<b>Coefficienti</b>	<b>Valori</b>
Coeff. di variazione $\sigma_x$	0.170
Coeff. di variazione $\sigma_y$	0.141
Coeff. di correlazione	0.709

Tabella 5.20 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 13:00-14:00

<b>Coefficienti</b>	<b>Valori</b>
Coeff. di variazione $\sigma_x$	0.030
Coeff. di variazione $\sigma_y$	0.143
Coeff. di correlazione	0.542

Tabella 5.21 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 4/06/2015, 19:00-20:00

<b>Coefficienti</b>	<b>Valori</b>
Coeff. di variazione $\sigma_x$	0.014
Coeff. di variazione $\sigma_y$	0.068
Coeff. di correlazione	0.742

In questo caso, i coefficienti di correlazione sono tutti superiori allo 0.3 e, dunque, la correlazione tra le due serie di dati, cioè tra i flussi rilevati in campo e quelli stimati dal modello è di tipo diretta, e a seconda del valore assunto, variabile tra forte e moderata.

Si riportano qui di seguito i risultati delle analisi effettuate nell'ambito della stessa sezione MOD11, per il giorno successivo di rilievo.

In allegato sono, invece, disponibili i risultati ottenuti per l'altro verso di percorrenza analizzato della sezione MOD11, e cioè l'arco 2.

Si riportano qui di seguito i risultati delle analisi riferite al successivo giorno di rilievo.

In allegato sono, invece, disponibili i risultati ottenuti nell'ambito della stessa sezione MOD11, per l'altro verso di percorrenza, e cioè l'arco 2.

**14. Sensore MOD11, Arco 1 – lunedì 08/06/2015 – 8:00-9:00, 13:00-14:00, 19:00-20:00**

L'andamento del flusso veicolare stimato dal software e quello rilevato in campo ogni quarto d'ora nelle tre fasce orarie analizzate sono riportati di seguito in Tabella 5.22, Tabella 5.23 e Tabella 5.24, e rappresentati graficamente in Figura 5.122, Figura 5.123 e Figura 5.124.

Tabella 5.22 Flusso rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 8:00-9:00

Data	Ora	Veicoli STIMATI del quarto d'ora	Veicoli RILEVATI del quarto d'ora
08/06/2015	8:00-8:15	209.155	296
08/06/2015	8:15-8:30	242.220	307
08/06/2015	8:30-8:45	248.066	286
08/06/2015	8:45-9:00	257.561	264

Tabella 5.23 Flusso rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 13:00-14:00

Data	Ora	Veicoli STIMATI del quarto d'ora	Veicoli RILEVATI del quarto d'ora
08/06/2015	13:00-13:15	235.858	326
08/06/2015	13:15-13:30	231.345	354
08/06/2015	13:30-13:45	225.772	317
08/06/2015	13:45-14:00	221.394	256

Tabella 5.24 Flusso rilevato e stimato –MOD11, Arco 1– 08/06/2015, 19:00-20:00

Data	Ora	Veicoli STIMATI del quarto d'ora	Veicoli RILEVATI del quarto d'ora
08/06/2015	19:00-19:15	232.090	293
08/06/2015	19:15-19:30	226.560	277
08/06/2015	19:30-19:45	223.175	261
08/06/2015	19:45-20:00	221.133	265

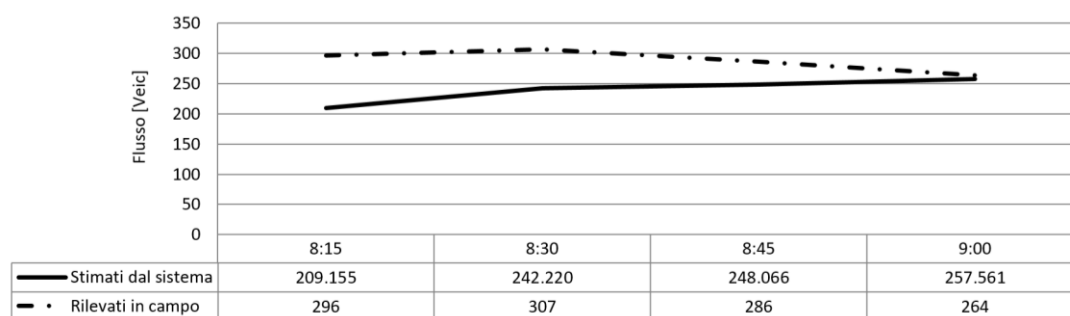


Figura 5.122 Andamento flusso veicolare – MOD11, Arco 1 – 08/06/15, 8:00-9:00

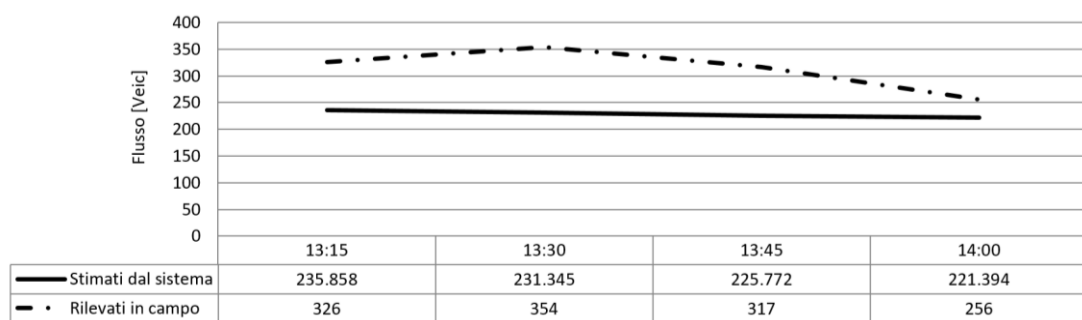


Figura 5.123 Andamento flusso veicolare–MOD11, Arco 1–08/06/15, 13:00-14:00

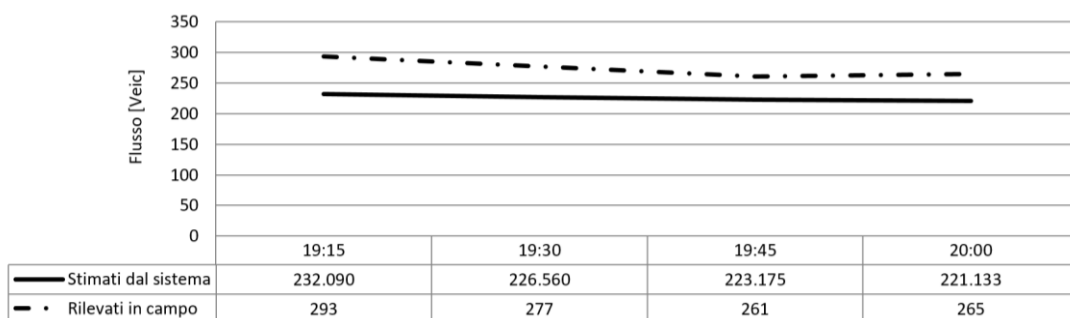


Figura 5.124 Andamento flusso veicolare–MOD11, Arco 1–08/06/15, 19:00-20:00

Per l'arco 2, risultano valide le stesse considerazioni fatte per l'analisi del precedente verso di percorrenza, cioè l'arco 1. Anche in questo caso si ha una buona corrispondenza tra le due serie di dati, specialmente nella fascia oraria serale.

I risultati dell'analisi di affidabilità dei flussi di traffico, sono schematizzati qui di seguito in Figura 5.125, Figura 5.126 e Figura 5.127.

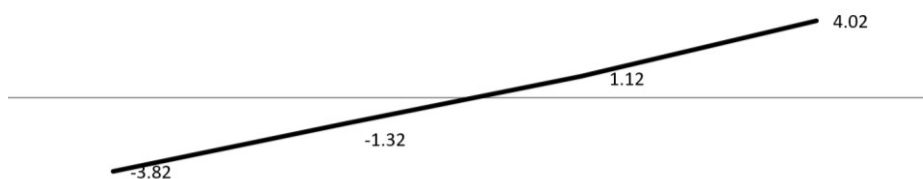


Figura 5.125 Analisi di affidabilità dei flussi,MOD11, Arco 1,08/06/15, 8:00-9:00

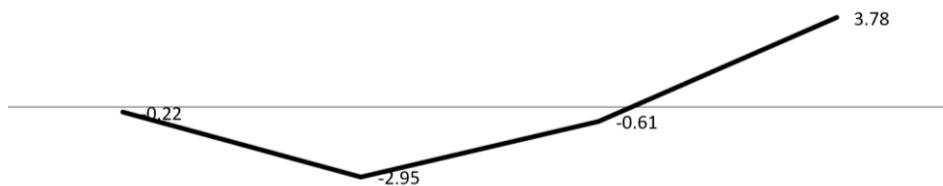


Figura 5.126 Analisi di affidabilità dei flussi,MOD11, Arco 1,08/06/15,13:00-14:00

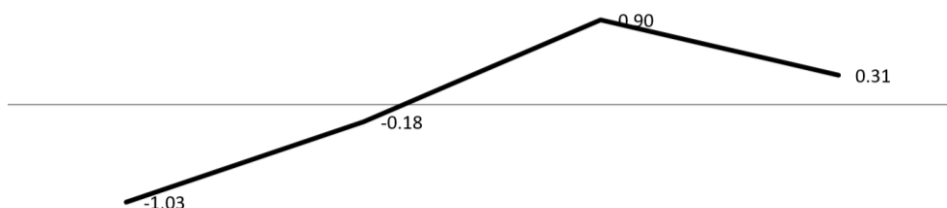


Figura 5.127 Analisi di affidabilità dei flussi, MOD11, Arco 1, 08/06/15, 19:00-20:00

Dal momento che le differenze tra la percentuale di flusso orario stimato dal modello durante una simulazione e la percentuale di flusso orario rilevato in campo riferita sempre allo stesso intervallo non sono elevate, gli scostamenti delle curve rispetto alla condizione orizzontale sono poco rilevanti.

Infine, la Tabella 5.25, la Tabella 5.26 e la Tabella 5.27 riassumono i valori ottenuti per il coefficiente di variazione, il coefficiente di correlazione e quello di determinazione.

Tabella 5.25 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 8:00-9:00

Coefficienti	Valori
Coeff. di variazione $\sigma_x$	0.088
Coeff. di variazione $\sigma_y$	0.063
Coeff. di correlazione	0.555

Tabella 5.26 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 13:00-14:00

Coefficienti	Valori
Coeff. di variazione $\sigma_x$	0.028
Coeff. di variazione $\sigma_y$	0.132
Coeff. di correlazione	0.773

Tabella 5.27 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 19:00-20:00

Coefficienti	Valori
Coeff. di variazione $\sigma_x$	0.021
Coeff. di variazione $\sigma_y$	0.052
Coeff. di correlazione	0.958

Anche in questo caso, la correlazione risulta forte.



## 5.10 Determinazione dell'affidabilità dei tempi di viaggio

“L'affidabilità è definita come la capacità del sistema di trasporto di garantire un livello di servizio avente una certa qualità attesa, sulla base della quale gli utenti hanno organizzato la loro attività” (OECD, 2010). La parola chiave è l'aggettivo “attesa”; infatti, secondo tale definizione l'affidabilità può essere migliorata sia fornendo un livello più elevato di affidabilità sia cambiando le aspettative dell'utente nei confronti del suddetto livello.

Attualmente, si è soliti parlare di affidabilità dei tempi di percorrenza di un sistema di trasporto, meglio nota con il termine anglosassone di *Travel Time Reliability*; questo perché riuscire a garantire tempi medi di percorrenza costanti è diventato un elemento fondamentale per poter affermare che una rete di trasporto ha una buona affidabilità. Infatti, una definizione alquanto semplice, ma piuttosto veritiera, è quella di definire un sistema di trasporto affidabile fintanto che i tempi di percorrenza che lo caratterizzano sono coerenti con i tempi medi previsti. È possibile affermare, dunque, che una rete stradale è tanto più affidabile quanto più i tempi di percorrenza effettivi si avvicinano al loro valore medio: in questo caso, minore è la differenza tra i due tempi, maggiore sarà la percezione di affidabilità del sistema di trasporto da parte degli utenti (Figura 5.128).

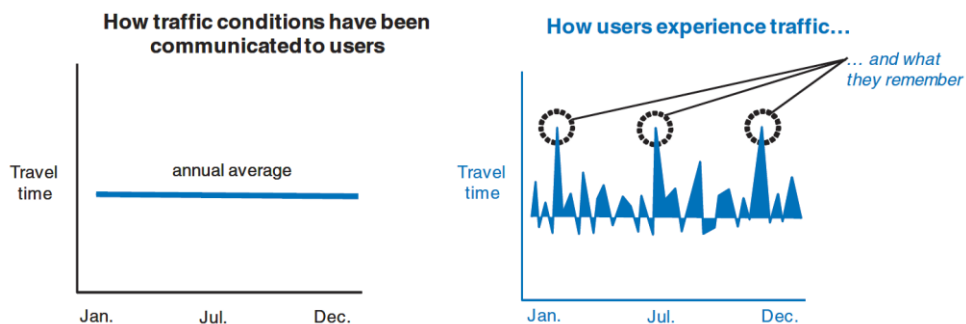


Figura 5.128 Percezione delle condizioni di traffico da parte degli utenti (OECD, 2010)

Per tali ragioni, avvalendosi dei dati di traffico rilevati dal sistema di monitoraggio e delle stime prodotte dal modello di simulazione implementato nel sistema ITS, è stata svolta un'analisi statistica per valutare l'affidabilità della rete viaria urbana di Catania ed analizzare, così, le prestazioni del sistema di trasporto e le eventuali “variabilità” di funzionamento. Nello specifico, l'analisi è stata svolta secondo tre livelli di dettaglio: un primo livello di rete, un secondo livello di percorso, fino ad arrivare al terzo livello basato su un'analisi di arco (Figura 5.129).



Figura 5.129 Livelli di analisi

A seguire nei paragrafi successivi, sono riportati i principali risultati ottenuti.

### 5.10.1 Livello 1: Analisi globale di rete

Con riferimento all'analisi globale dell'affidabilità della rete viaria urbana di Catania, è stata presa in considerazione la stessa rete coincidente con quella individuata per le precedenti analisi e quindi, le grandezze di traffico utilizzate, quali flussi e tempi di percorrenza, sono quelli simulati sugli archi appartenenti al grafo di assegnazione.

Essendo l'analisi riferita a intervalli temporali di durata pari ad un'ora, si è reso necessario procedere ad una aggregazione dei dati provenienti dal modello. Nello specifico, il calcolo dei tempi di percorrenza e dei flussi entranti ed uscenti della rete è stato eseguito introducendo un fattore correttivo nelle formulazioni presenti nella parte metodologica, tenendo conto dell'intervallo di tempo presente tra una simulazione e la successiva (pari a 15 minuti). Le formule generali utilizzate coincidono, dunque, con le seguenti equazioni:

$$T_{d,i-j} = \frac{\sum_{k=1}^N t_{k,d,i-j}}{n} \quad \text{Eq. (5.1)}$$

$$F_{e_{d,i-j}} = \frac{\sum_{k=1}^N f_{e_{k,d,i-j}}}{n} \quad \text{Eq. (5.2)}$$

$$F_{u_{d,i-j}} = \frac{\sum_{k=1}^N f_{u_{k,d,i-j}}}{n} \quad \text{Eq. (5.3)}$$

con  $n = 4$  che rappresenta il numero di simulazioni eseguite durante l'intervallo orario di analisi considerato.

La procedura computazionale riguardante l'analisi statistica dei dati e la determinazione dei relativi indici è stata eseguita facendo riferimento ad un periodo di durata pari a due settimane, tenendo in considerazione sia giorni feriali che festivi. Inoltre, l'analisi è stata

eseguita valutando sia le variazioni presenti all'interno della stessa giornata (analisi intra-giornaliera), che considerando l'andamento durante la settimana (analisi iter-giornaliera).

Dal momento che i dati utilizzati seguono una distribuzione di Gauss, la formula per il calcolo del Buffer Index è stata particolarizzata come segue:

$$B = Z \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Eq. (5.4)}$$

dove:

- $n$  rappresenta la somma dei tempi medi di percorrenza;
- $\sigma$  è la deviazione standard dei tempi di percorrenza;
- $Z$  è il coefficiente di affidabilità relativo all'intervallo di confidenza considerato, che in accordo con la tabella Z della distribuzione standardizzata è posto pari a 1,96.

A titolo esemplificativo, si riporta l'analisi intra-giornaliera effettuata per uno dei giorni considerati, e successivamente a seguire i risultati ottenuti dallo svolgimento dell'analisi iter-giornaliera.

#### **ANALISI INTRA-GIORNALIERA**

Utilizzando le formulazioni precedenti, sono stati calcolati i valori dei tempi di percorrenza e dei flussi entranti ed uscenti della rete riferiti a ciascun intervallo orario della giornata presa in esame. I relativi risultati, ottenuti dalla media dei valori delle quattro simulazioni all'interno di ciascun intervallo orario, sono riportati in Tabella 5.28.

I valori dei tempi di percorrenza e dei flussi tendono a manifestare un incremento in corrispondenza delle ore di punta.

Diagrammando questi valori 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, in questo caso la variazione della domanda oraria nel corso della giornata (ma si può analizzare anche la variazione della domanda giornaliera tra i diversi giorni della settimana). Inoltre, si osserva in maniera immediata la presenza di ore di punta in corrispondenza delle quali si registra un incremento delle misure di rete, e la stretta corrispondenza tra i valori dei tempi di percorrenza e i valori dei flussi veicolari: infatti, all'aumentare dei flussi si ha un aumento anche dei tempi di percorrenza (Figura 5.130).

Tabella 5.28 Tempi e flussi medi orari di rete – 16/06/2016

Orario di riferimento	$\Sigma$ Tempi medi di percorrenza [h]	$\Sigma$ Flussi entranti medi [veic/h]	$\Sigma$ Flussi uscenti medi [veic/h]
00:00-01:00	28.200	598908.703	597947.654
01:00-02:00	28.182	499739.446	498667.884
02:00-03:00	28.152	312224.811	311780.853
03:00-04:00	28.139	229831.916	229277.912
04:00-05:00	28.141	231301.069	230341.976
05:00-06:00	28.171	382634.913	379651.907
06:00-07:00	28.260	828322.253	820820.160
07:00-08:00	28.502	1993027.478	1975936.565
08:00-09:00	28.642	2605158.216	2587674.846
09:00-10:00	28.657	2515225.925	2500530.913
10:00-11:00	28.577	2354301.568	2338859.415
11:00-12:00	28.563	2346415.815	2329606.572
12:00-13:00	28.566	2378844.639	2361531.347
13:00-14:00	28.614	2546677.730	2528511.836
14:00-15:00	28.543	2327398.469	2312117.703
15:00-16:00	28.552	2317039.259	2300903.518
16:00-17:00	28.601	2547379.674	2530012.923
17:00-18:00	28.632	2675222.142	2657324.471
18:00-19:00	28.735	2713406.707	2695738.666
19:00-20:00	28.642	2693798.021	2677425.498
20:00-21:00	28.677	2490246.718	2476395.152
21:00-22:00	28.395	1709006.517	1702506.301
22:00-23:00	28.287	1102317.122	1097770.170
23:00-24:00	28.249	871566.275	867073.436

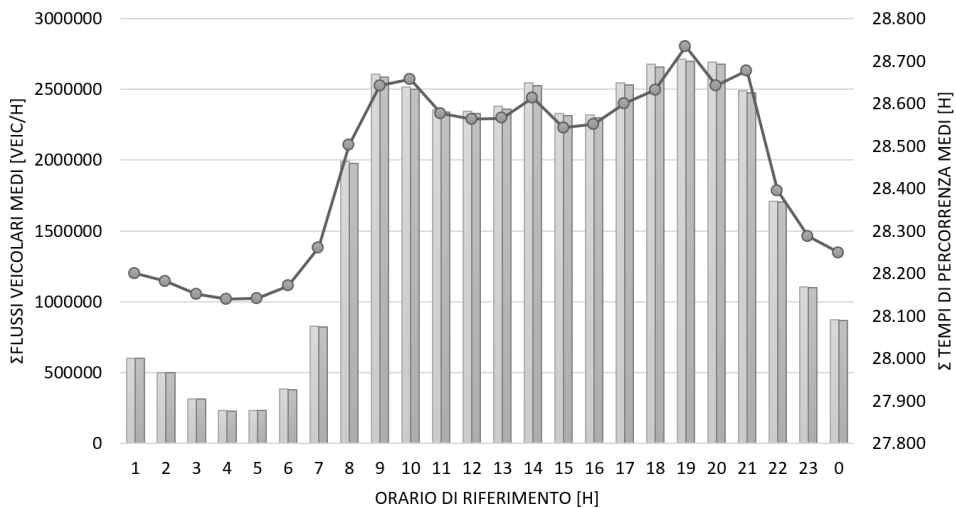


Figura 5.130 Analisi globale di rete - 16/06/2016

Effettuando l'analisi anche per i successivi giorni considerati, si può affermare che questo fenomeno è particolarmente accentuato in corrispondenza delle ore di punta dei giorni feriali, ore in cui è più elevato il numero di spostamenti effettuati dagli utenti nella rete di trasporto. In generale, tali variazioni si ripetono ciclicamente come andamento, anche se i valori della domanda nei singoli sottoperiodi assumono valori diversi. Tutto ciò porta all'insorgere di fenomeni di congestione che compromettono in generale il funzionamento della rete di trasporto, con dirette ripercussioni in termini di riduzione dell'affidabilità.

A questo punto, a partire dai dati sopra calcolati, utilizzando l'equazione relativa alla deviazione standard dei tempi di percorrenza, è stato ottenuto il seguente valore:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N (TT_{d,i-j} - M)^2} = 12,47 \text{ minuti}$$

Aggiungendo e sottraendo questa quantità al tempo medio di percorrenza, è stato individuato il range di variazione dei tempi effettivamente spesi in rete nell'arco delle 24 ore, i cui estremi superiore ed inferiore sono rappresentati dai valori assunti dal Travel Time Window. Dalla Figura 5.131 si nota che, anche in questo caso, lo scostamento maggiore rispetto al valore medio del tempo di percorrenza si verifica in corrispondenza delle ore di punta.

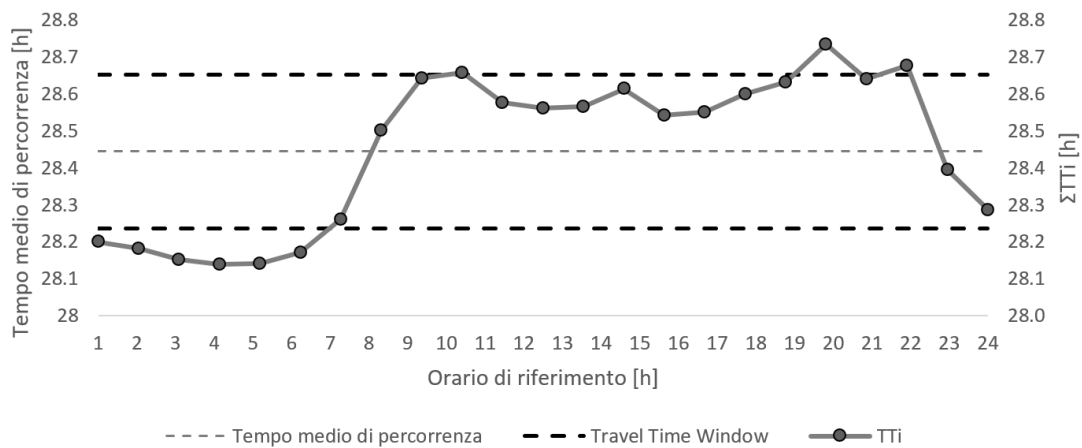


Figura 5.131 Travel Time Window dei tempi medi orari di rete – 16/06/2016

Infine, sono stati calcolati i valori degli indici di buffer quali il Buffer Index, il Buffer Time e il Planning Time Index. Ai fini dell'applicazione della formula particolarizzata per il calcolo del buffer index, è stata verificata, preliminarmente, la distribuzione di tipo gaussiano dei dati analizzati, riportata in Figura 5.132.

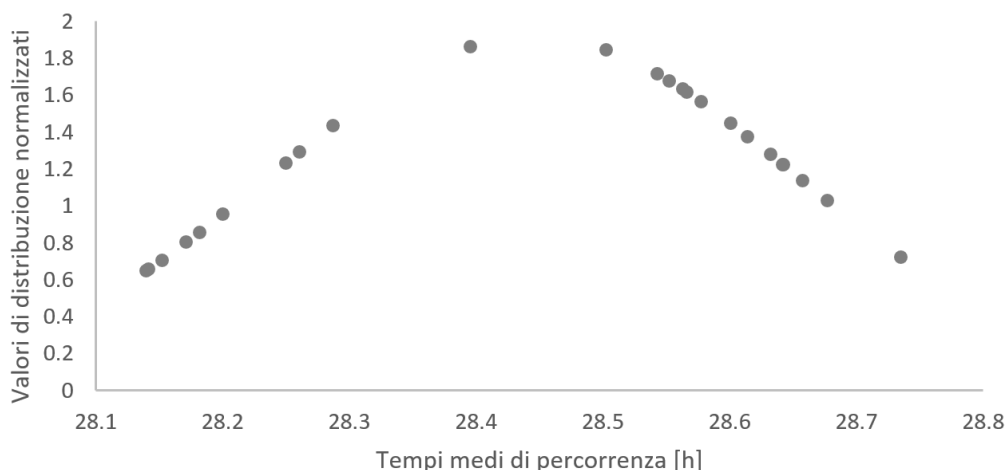


Figura 5.132 Distribuzione gaussiana dei tempi medi orari di rete – 16/06/2016

Questo permette dunque l'applicazione dell'equazione sopra citata, pertanto, per tale analisi, utilizzando l'equazione (3.8) e particolarizzandola per la rete di trasporto stradale etnea si ha:

$$B = Z \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 1,50\%$$

Questo risultato è stato utilizzato per calcolare il Buffer Time, cioè il tempo extra da considerare in aggiunta rispetto al tempo medio di percorrenza, pari a 25,60 minuti, e il valore del tempo effettivamente speso in rete dagli utenti, ossia il cosiddetto Planning Time Index pari a 28,87 ore.

Si riportano in allegato i risultati ottenuti per i successivi giorni di analisi considerati.

#### **ANALISI INTER-GIORNALIERA**

Considerando i valori dei tempi medi di percorrenza e quelli dei buffer index dei relativi giorni analizzati, è stata eseguita un'analisi inter-giornaliera che ha permesso di poter definire i valori del Planning Time Index e del Buffer Time giornalieri (Tabella 5.29), che sono stati diagrammati in Figura 5.133. Questo grafico mostra lo scostamento tra il tempo medio di percorrenza ed il tempo effettivamente speso in rete, fornendo un'immediata visualizzazione della misura della variabilità dei tempi di percorrenza di una rete durante differenti giorni della settimana, e quindi a seconda delle diverse condizioni di traffico e di congestione che possono insorgere su di essa.

In particolare, secondo le stime effettuate dal modello di simulazione, tale differenza risulta maggiormente accentuata in corrispondenza dei giorni feriali. Questo perché la mobilità all'interno dell'area urbana di Catania risulta fortemente influenzata dal fenomeno del pendolarismo per gli spostamenti casa-scuola e casa-lavoro.

Tabella 5.29 Analisi inter-giornaliera di rete: Buffer Index, Planning Time Index e Buffer Time – 16-27/06/2016

Giorno	Tempo di percorrenza medio giornaliero [h]	Buffer Index giornaliero [%]	Planning Time Index [h]	Buffer Time [min]
16/06/2016	28.445	1.50%	28.872	25.601
18/06/2016	28.433	1.34%	28.814	22.860
19/06/2016	28.119	0.04%	28.130	0.675
20/06/2016	28.442	1.55%	28.883	26.451
23/06/2016	28.462	1.70%	28.946	29.031
25/06/2016	28.430	1.31%	28.802	22.346
26/06/2016	28.119	0.05%	28.133	0.844
27/06/2016	28.465	1.65%	28.935	28.181

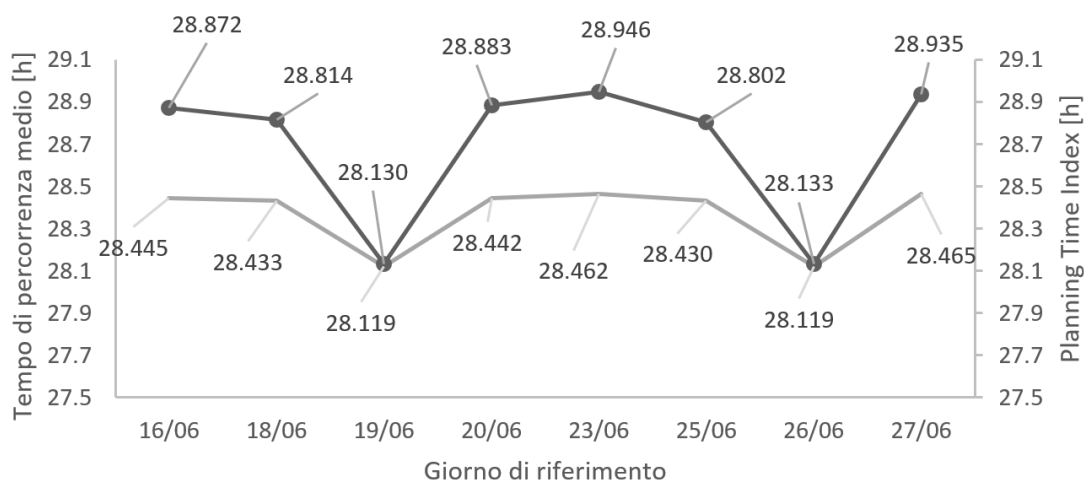


Figura 5.133 Diagramma dell'analisi inter-giornaliera di rete – 16-27/06/2016

## 5.10.2 Livello 2: Analisi di percorso

Per il secondo livello di analisi, sono stati individuati nell'area urbana di Catania tre differenti percorsi di collegamento tra una stessa coppia O/D, con origine presso la Cittadella Universitaria (ubicata in Viale Andra Doria) e con destinazione in Piazza Europa (Figura 5.134). Su questo tragitto gravita un ampio bacino d'utenza, poiché caratterizzato dalla presenza di numerose attività economiche e servizi.

I percorsi selezionati sono stati indicati per semplicità con la seguente terminologia:

1. Percorso Ognina;
2. Percorso Passo Gravina;
3. Percorso Corso delle Province.



Figura 5.134 Mappa dei tre percorsi selezionati: Ognina (destra), Passo Gravina (sinistra) e Corso delle Province (centro)

Anche in questo caso, l'analisi di percorso eseguita è stata strutturata sulla base della determinazione dei tempi di percorrenza medi orari e degli indici statistici quali la deviazione standard dei tempi di percorrenza con i relativi valori di travel time window, e dei tre indici di buffer, ossia buffer index, planning time index e buffer time.

Inoltre, lo studio si è focalizzato su un'analisi sia intra-giornaliera che inter-giornaliera.

Questo ha permesso di valutare non solo la variabilità giornaliera e settimanale dei tempi di percorrenza di uno stesso percorso, ma anche di operare un confronto tra diversi percorsi di collegamento tra una stessa coppia O/D.

A seguire si riportano i principali risultati ottenuti.

### **ANALISI INTRA-GIORNALIERA**

Nella Tabella 5.30 sono indicati i tempi di percorrenza medi orari calcolati relativi ai tre percorsi analizzati,

Successivamente, utilizzando l'equazione per il calcolo della deviazione standard dei tempi medi di percorrenza per i tre percorsi si è giunti ai seguenti risultati:

- deviazione standard del percorso OGNINA = 9,95 secondi;
- deviazione standard del percorso PASSO GRAVINA = 13,56 secondi;
- deviazione standard del percorso CORSO DELLE PROVINCE = 10,48 secondi;

A questo punto, a partire dai dati sopra calcolati sono stati individuati i rispettivi Travel Time Window, rappresentati in Figura 5.135, Figura 5.136 e Figura 5.137. Dai vari diagrammi si osserva quanto già visto per la precedente analisi di rete: i valori del tempo di percorrenza tendono ad avere uno scostamento maggiore rispetto al tempo medio soprattutto in corrispondenza delle ore di punta.



Pertanto, si può sicuramente affermare che un percorso, seppur più breve (in termini di lunghezza di percorso), se caratterizzato da un'elevata differenza tra il tempo effettivo e il tempo medio di percorrenza, risulterà meno affidabile di un altro percorso più lungo, caratterizzato da una differenza minore.

Tabella 5.30 Tempi medi orari dei tre percorsi analizzati -16/06/2017

Orario di riferimento	Tempo orario medio	Tempo orario medio	Tempo orario medio
	OGNINA [min]	PASSO GRAVINA [min]	CORSO DELLE PROVINCE [min]
00:00-01:00	8.875	11.389	8.991
01:00-02:00	8.861	11.371	8.975
02:00-03:00	8.834	11.342	8.945
03:00-04:00	8.823	11.330	8.933
04:00-05:00	8.824	11.333	8.934
05:00-06:00	8.850	11.360	8.961
06:00-07:00	8.927	11.448	9.041
07:00-08:00	9.134	11.676	9.264
08:00-09:00	9.219	11.783	9.344
09:00-10:00	9.188	11.748	9.327
10:00-11:00	9.168	11.724	9.290
11:00-12:00	9.170	11.726	9.292
12:00-13:00	9.182	11.734	9.303
13:00-14:00	9.211	11.748	9.331
14:00-15:00	9.160	11.713	9.282
15:00-16:00	9.183	11.770	9.303
16:00-17:00	9.237	11.856	9.361
17:00-18:00	9.256	11.916	9.406
18:00-19:00	9.267	11.895	9.427
19:00-20:00	9.258	11.884	9.386
20:00-21:00	9.209	11.824	9.335
21:00-22:00	9.051	11.631	9.171
22:00-23:00	8.954	11.485	9.075
23:00-24:00	8.919	11.435	9.038

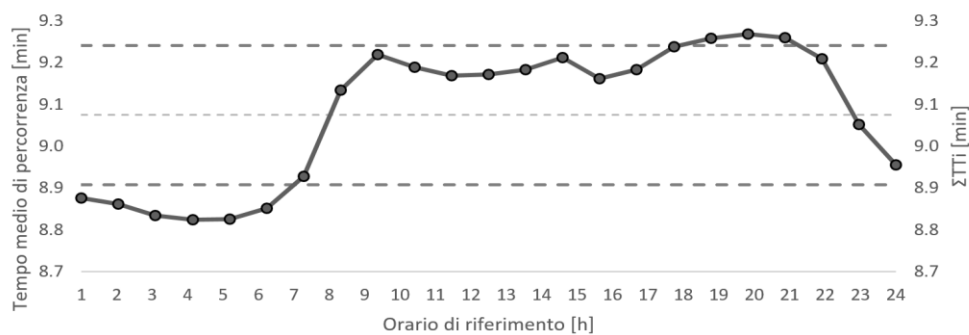


Figura 5.135 Travel Time Window dei tempi medi orari, Ognina, 16/06/2016

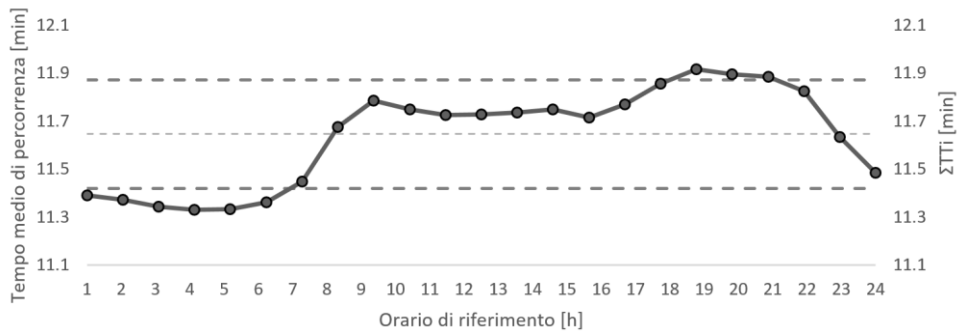


Figura 5.136 Travel Time Window dei tempi medi orari, P.Gravina, 16/06/16

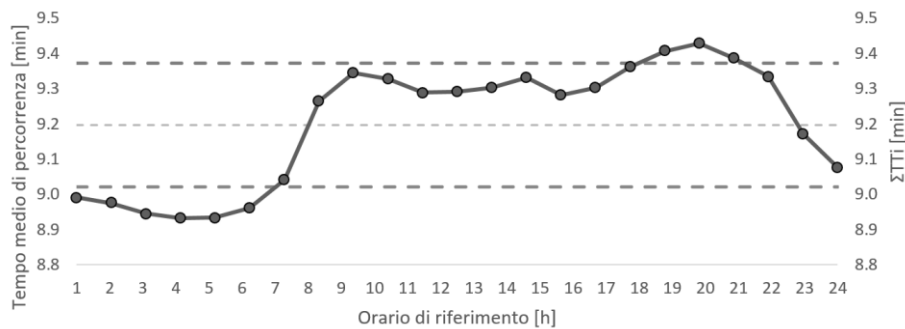


Figura 5.137 Travel Time Window dei tempi medi orari, C.Province, 16/06/16

### ANALISI INTER-GIORNALIERA

La Tabella 5.31 contiene i valori di deviazione standard ottenuti per i tre percorsi nei differenti giorni di analisi. Da questi si osserva che, quando il tempo di percorrenza di un itinerario presenta un'elevata variabilità, il valore della deviazione standard è anch'esso elevato e quindi l'affidabilità è bassa. Viceversa, quando gli spostamenti richiedono all'incirca lo stesso tempo, allora la deviazione standard è bassa e l'affidabilità elevata.

Le analisi effettuate sul buffer index (Tabella 5.32) indicano, invece, che quando questo valore diminuisce, la TTR aumenta. In particolare, dalla comparazione delle elaborazioni svolte per i tre percorsi, si osserva come in alcuni casi gli itinerari che presentano un tempo di percorrenza più elevato possono essere caratterizzati da migliori prestazioni in termini di affidabilità.

Questi risultati dimostrano la stretta correlazione tra il fenomeno della congestione e l'entità della TTR. Infatti, gli scostamenti più elevati tra tempi effettivi di percorrenza e tempi medi sono stati registrati nei giorni feriali, quando il fenomeno del pendolarismo risulta essere più accentuato (Figura 5.138, Figura 5.139 e Figura 5.140).

Tabella 5.31 Analisi inter-giornaliera di percorso: Tempo medio di percorrenza e Deviazione Standard- 16-27/06/2016

Giorno	OGNINA		PASSO GRAVINA		C. DELLE PROVINCE	
	Tempo di percorrenza medio giornaliero [min]	Deviazione Standard [sec]	Tempo di percorrenza medio giornaliero [min]	Deviazione Standard [sec]	Tempo di percorrenza medio giornaliero [min]	Deviazione Standard [sec]
16/06/2016	9.073	9.95	11.645	13.56	9.200	10.48
18/06/2016	9.025	6.84	11.601	8.80	9.182	8.24
19/06/2016	8.805	0.44	11.312	0.53	8.914	0.57
20/06/2016	9.096	14.77	11.607	11.11	9.220	15.24
23/06/2016	9.105	13.73	11.610	11.12	9.233	14.36
25/06/2016	9.023	7.02	11.588	9.13	9.181	8.46
26/06/2016	8.805	0.42	11.312	0.60	8.912	0.56
27/06/2016	9.084	10.52	11.614	11.39	9.280	16.74

Tabella 5.32 Analisi inter-giornaliera di percorso: Buffer Index, Planning Time Index e Buffer Time - 16-27/06/2016

Giorno	OGNINA			PASSO GRAVINA			C. DELLE PROVINCE		
	Buffer Index [%]	Planning Time [min]	Buffer Time [sec]	Buffer Index [%]	Planning Time [min]	Buffer Time [sec]	Buffer Index [%]	Planning Time [min]	Buffer Time [sec]
16/06/2016	2.20%	9.273	11.976	1.35%	11.802	9.432	2.30%	9.412	12.696
18/06/2016	1.52%	9.162	8.230	0.88%	11.703	6.125	1.81%	9.348	9.972
19/06/2016	0.07%	8.811	0.369	0.04%	11.317	0.271	0.09%	8.992	0.581
20/06/2016	3.26%	9.393	17.791	1.10%	11.735	7.661	3.35%	9.529	18.532
23/06/2016	3.03%	9.381	16.552	1.11%	11.739	7.732	3.15%	9.524	17.450
25/06/2016	1.56%	9.164	8.445	0.91%	11.693	6.327	1.86%	9.352	10.246
26/06/2016	0.06%	8.810	0.316	0.04%	11.317	0.271	0.08%	8.919	0.428
27/06/2016	2.33%	9.296	12.699	1.14%	11.746	7.944	3.67%	9.621	20.435

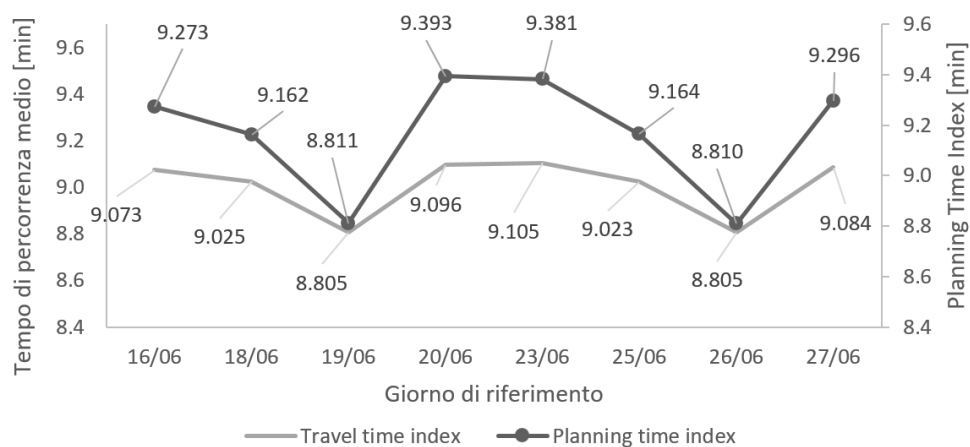


Figura 5.138 Diagramma analisi inter-giornaliera, percorso Ognina, 16-27/06/16

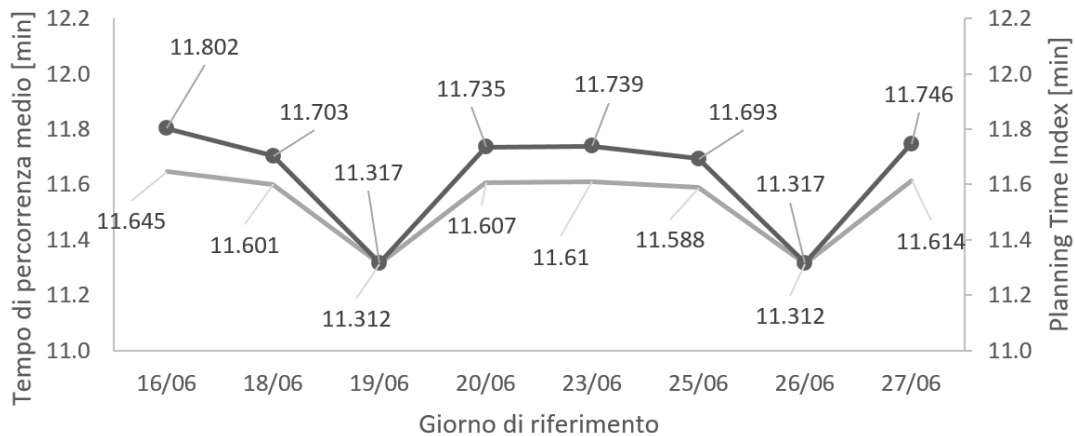


Figura 5.139 Diagramma analisi inter-giornaliera,percorso P.Gravina,16-27/06/16

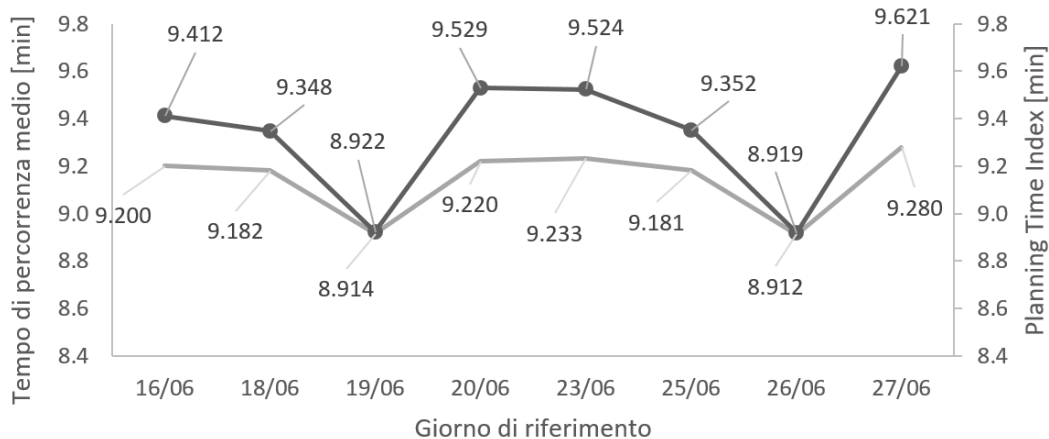


Figura 5.140 Diagramma analisi inter-giornaliera,percorso C.Province,16-27/06/16

Tuttavia, una rete congestionata non per forza deve essere “inaffidabile”, infatti, l’inaffidabilità si riferisce ad un ritardo non noto con anticipo. Quindi, poiché i tempi di viaggio lungo un’arteria in cui si ha congestione possono essere comunque prevedibili, una rete congestionata non necessariamente è inaffidabile. Nonostante ciò, è comunque riconosciuto il fatto che azioni dirette alla riduzione del fenomeno della congestione possono portare un miglioramento dell’affidabilità e, similmente, azioni che mirano all’incremento dell’affidabilità possono ridurre la congestione.

### 5.10.3 Livello 3: Analisi di arco

Infine, il terzo livello di analisi è stato effettuato a livello di arco, scegliendo due tratti della rete situati in parti diverse dell’area urbana di Catania, ma con lunghezza pressoché simile.

Gli archi selezionati per questa terza analisi sono stati i seguenti:

1. Corso Italia (1.061 metri);
2. Viale Marco Polo (1.262 metri).

La decisione di svolgere tale analisi è ricaduta su questi archi per poter permettere di comprendere ed analizzare le diverse caratteristiche che presentano archi localizzati nella zona centrale dell'area urbana di Catania (in questo caso Corso Italia) e archi localizzati nella zona più periferica dell'area urbana (Viale Marco Polo).

Anche in questo caso sono state svolte un'analisi intra-giornaliera ed una inter-giornaliera. Si riportano di seguito i principali risultati ottenuti.

#### **ANALISI INTRA-GIORNALIERA**

Nella Tabella 5.33 sono indicati i tempi di percorrenza medi orari calcolati relativi ai tre percorsi analizzati:

Tabella 5.33 Tempi medi orari dei tre percorsi analizzati -16/06/2017

Orario di riferimento	Tempo orario medio CORSO ITALIA [min]	Tempo orario medio VIALE MARCO POLO [min]
00:00-01:00	2.695	3.054
01:00-02:00	2.691	3.049
02:00-03:00	2.682	3.039
03:00-04:00	2.679	3.035
04:00-05:00	2.679	3.035
05:00-06:00	2.689	3.043
06:00-07:00	2.717	3.067
07:00-08:00	2.794	3.133
08:00-09:00	2.827	3.159
09:00-10:00	2.815	3.150
10:00-11:00	2.809	3.143
11:00-12:00	2.811	3.143
12:00-13:00	2.815	3.148
13:00-14:00	2.825	3.157
14:00-15:00	2.806	3.142
15:00-16:00	2.807	3.141
16:00-17:00	2.824	3.156
17:00-18:00	2.866	3.162
18:00-19:00	2.833	3.165
19:00-20:00	2.829	3.165
20:00-21:00	2.813	3.152
21:00-22:00	2.755	3.104
22:00-23:00	2.724	3.080
23:00-24:00	2.714	3.068

Successivamente, utilizzando l'equazione per il calcolo della deviazione standard dei tempi medi di percorrenza per i due archi analizzati si è giunti ai seguenti risultati:

- deviazione standard del' arco CORSO ITALIA = 6,07 secondi;
- deviazione standard dell'arco VIALE MARCO POLO = 2.99 secondi;

Dunque, a partire dai dati sopra calcolati sono stati individuati i rispettivi Travel Time Window, rappresentati in Figura 5.141 e Figura 5.142. Anche in questo caso valgono le medesime considerazioni ottenute nel precedente livello di analisi. In particolare, si nota come il percorso più esterno all'area urbana di Catania, pur presentando tempi medi di percorrenza maggiori, è caratterizzato da valori minori della deviazione standard. Questo poiché, essendo soggetto a minori fenomeni di congestione, presenta una maggiore affidabilità dei tempi di percorrenza.

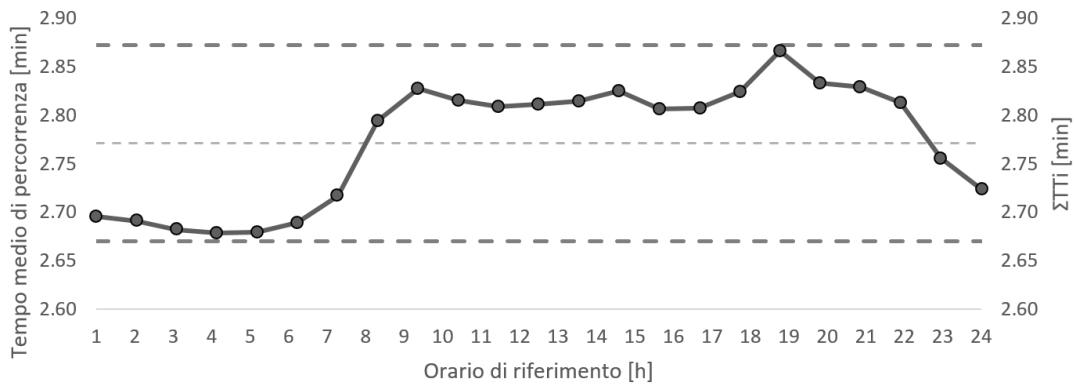


Figura 5.141 Travel Time Window dei tempi medi orari, Arco C.Italia, 16/06/16

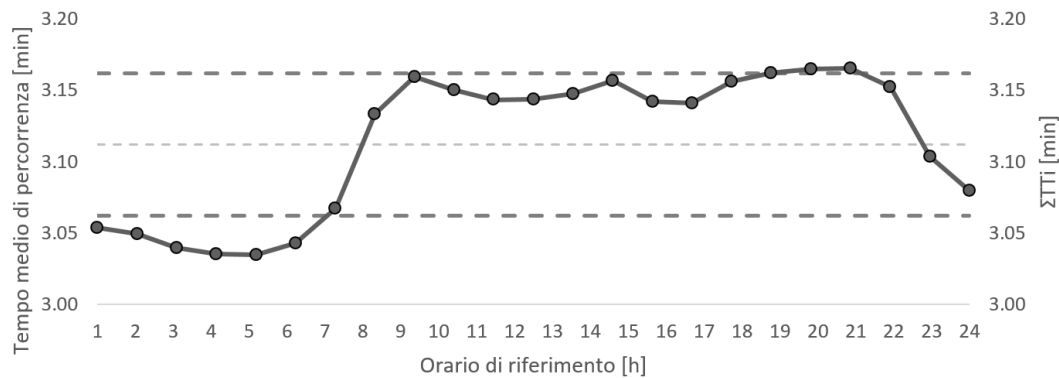


Figura 5.142 Travel Time Window dei tempi medi orari, Arco V.M.Polo, 16/06/16

### **ANALISI INTER-GIORNALIERA**

La Tabella 5.34 contiene i valori di deviazione standard ottenuti per i due archi nei differenti giorni di analisi. Nel caso dell'arco più esterno all'area urbana di Catania si notano due caratteristiche importanti riguardanti i valori ottenuti della deviazione standard: essi risultano essere più bassi e presentano una minore variabilità, sinonimo di una maggiore affidabilità dei tempi di percorrenza.

Tabella 5.34 Analisi inter-giornaliera di arco: Tempo medio di percorrenza e Deviazione Standard– 16-27/06/2016

Giorno	CORSO ITALIA		VIALE MARCO POLO	
	Tempo di percorrenza medio giornaliero [min]	Deviazione Standard [sec]	Tempo di percorrenza medio giornaliero [min]	Deviazione Standard [sec]
16/06/2016	2.785	6.07	3.112	2.99
18/06/2016	2.758	2.83	3.098	2.13
19/06/2016	2.670	0.09	3.030	0.19
20/06/2016	2.771	3.73	3.112	3.12
23/06/2016	2.772	3.73	3.115	3.16
25/06/2016	2.758	2.87	3.100	2.18
26/06/2016	2.670	0.10	3.030	0.18
27/06/2016	2.773	3.79	3.125	3.63

In

Tabella 5.35 sono riassunti, invece, i risultati ottenuti per le analisi di buffer.

Tabella 5.35 Analisi inter-giornaliera di arco: Buffer Index, Planning Time Index e Buffer Time – 16-27/06/2016

Giorno	OGNINA			PASSO GRAVINA		
	Buffer Index [%]	Planning Time [min]	Buffer Time [sec]	Buffer Index [%]	Planning Time [min]	Buffer Time [sec]
16/06/2016	1.24%	2.820	2.072	1.13%	3.147	2.110
18/06/2016	0.58%	2.774	0.959	0.81%	3.123	1.506
19/06/2016	0.01%	2.670	0.016	0.05%	3.032	0.091
20/06/2016	0.76%	2.792	1.263	1.18%	3.149	2.203
23/06/2016	0.76%	2.793	1.264	1.20%	3.152	2.243
25/06/2016	0.59%	2.774	0.976	0.83%	3.126	1.544
26/06/2016	0.01%	2.670	0.016	0.05%	3.032	0.091
27/06/2016	0.78%	2.795	1.297	1.37%	3.168	2.569

Questi risultati dimostrano la stretta correlazione tra il fenomeno della congestione e l'entità della TTR. Infatti, gli scostamenti più elevati tra tempi effettivi di percorrenza e tempi medi sono stati registrati nei giorni feriali, quando il fenomeno del pendolarismo risulta essere più accentuato (Figura 5.143 e Figura 5.144).

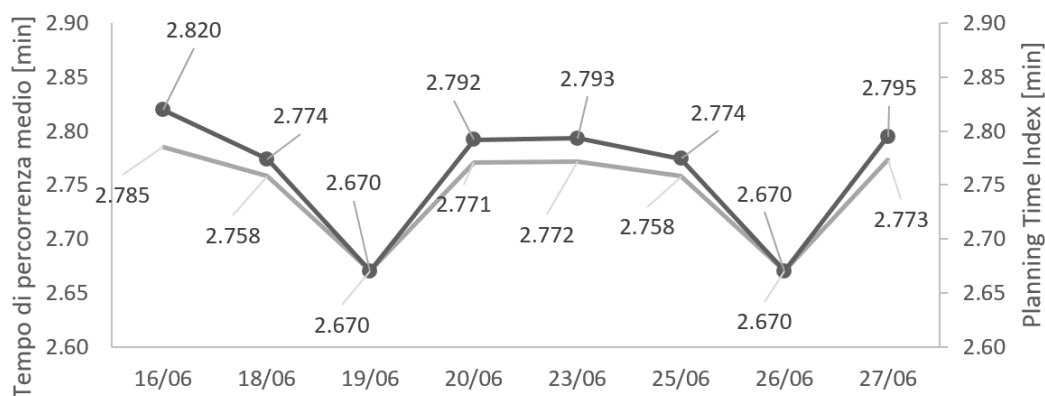


Figura 5.143 Diagramma analisi inter-giornaliera, Arco C.Italia, 16-27/06/16

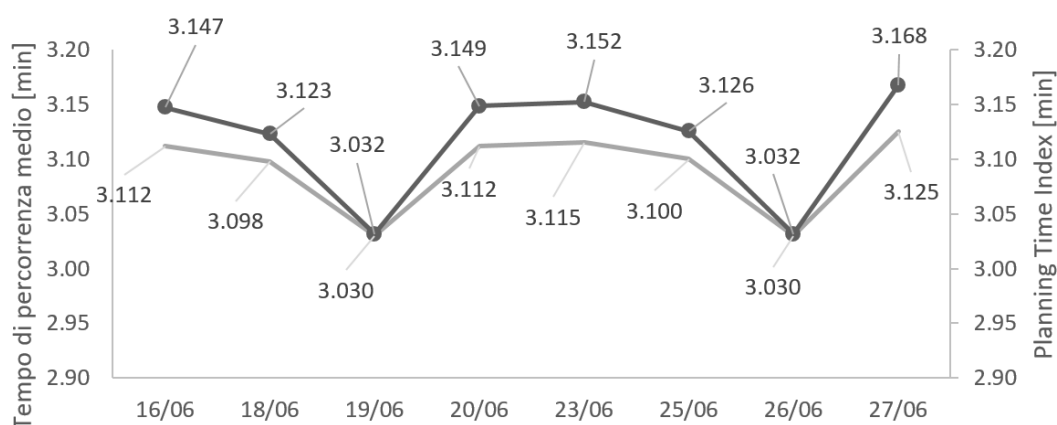


Figura 5.144 Diagramma analisi inter-giornaliera, Arco V.M.Polo, 16-27/06/16

Per concludere, è possibile affermare che la determinazione di opportuni indici statistici risulta essere importante per ottenere un incremento dei livelli di affidabilità della rete e per l'individuazione di migliori strategie di gestione da adottare.

In generale, esistono molte tecniche e strumenti disponibili che possono essere utilizzati per migliorare l'affidabilità di una rete di trasporto. Essi sono rappresentati dall'espansione della capacità fisica della rete, da una migliore gestione della capacità, da specifici meccanismi di tariffazione e da sistemi di informazione che intendono mitigare le avverse condizioni di inaffidabilità e ridurre l'incidenza. Con particolare riferimento a questi ultimi, i sistemi di informazione all'utenza aiutano a mitigare gli effetti di una scarsa affidabilità e a



ridurre lo stress ad essa associato, fornendo informazioni essenziali per gestire il ritardo e schedare gli spostamenti in modo migliore. Esistono differenti strumenti per la distribuzione di queste informazioni quali pannelli a messaggio variabile, navigatori on-board, internet, messaggi e smartphone.

Infine, svolgendo un'analisi del genere, i pianificatori e le agenzie possono determinare quali sono i fattori locali che influenzano l'affidabilità dei tempi di percorrenza e individuare opportune strategie di gestione che possono aiutare a migliorarla.

## **CAPITOLO 6**

# **CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI**

Il trasporto è un sistema complesso con meccanismi articolati e l'integrazione di tecnologie intelligenti con un tale tipo di sistema può avvenire soltanto attraverso una solida base di raccolta e diffusione dei dati relativi al traffico. Infatti, il fondamento di ogni rete di trasporto intelligente è basato sull'attività di rilievo di dati di traffico per conoscere e controllare lo stato delle condizioni di funzionamento della rete con un elevato livello di dettaglio e di precisione.

Attualmente, l'utilizzo integrato di tecnologie informatiche e telematiche nel mondo dei trasporti sta consentendo nel corso degli ultimi anni di sviluppare sistemi per il monitoraggio, il controllo e la gestione del traffico, per il rilievo dell'inquinamento atmosferico e per l'erogazione di servizi di infomobilità agli utenti della strada. Questi sistemi, seppure sviluppati in alcuni casi in forma ancora poco coordinata e con risultati differenti, hanno evidenziato il ruolo strategico delle tecnologie telematiche nella risoluzione dei problemi relativi alla mobilità.

Pertanto, muovendosi in tale direzione, la ricerca portata avanti ha permesso di individuare un approccio metodologico da seguire per la progettazione e realizzazione di un sistema di controllo e supervisione del traffico e relativi servizi di infomobilità. Nello specifico, lo studio presentato è caratterizzato da tre parti relative a diversi aspetti di ricerca scientifica: nella prima parte si è affrontato il problema relativo alla stima e alla previsione dei flussi di traffico mediante modelli di simulazione; nella seconda parte è stata trattata la tematica relativa all'esecuzione di analisi statistiche su misure di traffico per la validazione di schemi di rilievo e meccanismi simulativi; infine, nella terza parte è stato sviluppato uno

studio inerente l'affidabilità delle reti di trasporto in termini di stabilità delle prestazioni e garanzia di determinati livelli di funzionamento per differenti condizioni di esercizio.

Il focus della ricerca ha riguardato, innanzitutto, lo studio e sviluppo (installazione, implementazione e calibrazione) di un sistema di monitoraggio e controllo del traffico real-time operante su scala urbana, e che integra funzioni di:

- acquisizione real-time di misure provenienti dalla strada (sia da sensori fissi che da floating car data);
- simulazione real-time dello stato di tutta la rete oggetto di studio (anche della parte non direttamente monitorata);
- supporto alle decisioni per l'individuazione e messa in atto di opportune politiche di controllo e gestione del traffico;
- servizio all'utenza attraverso l'applicazione automatica real-time di sistemi informativi quali pannelli a messaggio variabile, portale web e cerca-percorso dinamico multimodale.

La metodologia proposta ha portato all'individuazione dell'architettura di questo sistema a partire da un insieme di requisiti (User Needs) che rappresentano le necessità dei soggetti interessati, che a loro volta interagiscono con il sistema di trasporto. Si tratta di una struttura che identifica gli attori, i bisogni, le funzioni, le caratteristiche e le sussistenti relazioni fra questi elementi a supporto della mobilità. Questo metodo ha permesso di definire, quindi, l'insieme dei servizi necessari, delle relazioni funzionali e delle caratteristiche identificate a partire dalle esigenze di tutti gli attori coinvolti.

In particolare è stato individuato il modello concettuale che sta alla base del sistema e la struttura della sua architettura, composta dalle quattro componenti: logico/funzionale, fisica, di comunicazione ed organizzativa.

Dunque, con specifico riferimento al caso studio realizzato nell'ambito di questa ricerca, l'architettura del sistema ITS implementato a Catania è costituito da:

- 29 sensori *Mobiltraf300* per il monitoraggio del traffico, misurazione dei flussi transitanti sulla rete e rilievo della composizione della flotta veicolare;
- 2 unità mobili di informazione all'utenza *Falcon 03*, da posizionare sulla rete per la fornitura di servizi di infomobilità;
- software *MMobility*, per la gestione da remoto dei sensori e l'elaborazione dei dati da essi rilevati;
- software *OPTIMA*, per la stima e la previsione on-line delle prestazioni della rete, basato su un modello di assegnazione dinamica e sul rolling horizon;
- software *Visum*, per la costruzione e calibrazione off-line del modello, utilizzato da *OPTIMA*;

- cerca-percorso dinamico intermodale e multimodale, *Hyperpath*, capace di determinare il percorso minimo sulla rete di trasporto, prendendo in considerazione le condizioni real-time e future della rete di trasporto;
- modulo ambientale *Habitat* (di recente implementazione), basato sul modello COPERT4, per il calcolo dinamico delle emissioni prodotte dal traffico veicolare stimato.

La combinazione del modello di assegnazione dinamica e l'integrazione, in tempo reale, delle misure di traffico rappresentano l'elemento chiave che incrementa, quindi, l'intelligenza del centro di controllo, costituendo la fonte dati e la base funzionale per le successive applicazioni ITS di controllo e regolazione del traffico, di monitoraggio ambientale e di infomobilità. Inoltre, la capacità del sistema di prevedere le condizioni del traffico sulla rete e di prendere decisioni riguardo i percorsi ottimali di utenti e di veicoli permette agli individui e alle aziende di pianificare le proprie attività in maniera più efficiente, ottenendo un notevole risparmio per la società nel suo complesso.

La metodologia presentata per la realizzazione di questo sistema, così concepito, è scalabile ed esportabile in vari contesti metropolitani, dove il fenomeno della congestione è elevato e la variazione durante la giornata dei flussi e dei tempi non è trascurabile.

Nello sviluppo della tesi sono state introdotte, inoltre, due metodologie riguardanti rispettivamente l'analisi statistica dei dati di traffico, ottenuti dallo schema di monitoraggio e dal modello previsionale, e la valutazione dell'affidabilità della rete di trasporto. L'applicazione di queste due metodologie è stata realizzata sulla stessa rete oggetto di studio, a partire dai dati provenienti dal modello di simulazione implementato.

Con riferimento all'applicazione della prima metodologia, relativa all'analisi dei dati di traffico, prima di pervenire alla formulazione dei risultati finali, è stata svolta un'analisi statistica approfondita dei dati disponibili, volta a comprendere nel dettaglio quali aspetti, non solo dal punto di vista tra strada e veicolo, ma anche tenendo presenti le interferenze reciproche dei veicoli sulla strada, incidono maggiormente sulla formazione della congestione in termini di maggiori code e tempi di percorrenza. Questo ha permesso di controllare la precisione dei rilievi e di valutare la bontà della capacità estimativa del modello di simulazione.

I risultati più importanti conseguiti per quanto riguarda il confronto tra i dati rilevati manualmente e quelli forniti dal sensore possono essere sintetizzati in tal modo:

- si è osservato che il fenomeno dell'oscuramento rappresenta una delle cause che può portare alla sottostima dei dati rilevati. Questo è caratterizzante del fatto che il numero dei veicoli leggeri rilevati tramite rilievo manuale risulta essere leggermente superiore a quello registrato dal sensore;

- inoltre, l'oscuramento parziale di un veicolo transitante nella corsia più lontana dal sensore, può essere la causa di uno scarto dei dati relativi al veicolo oscurato in quanto viene rilevato solo il transito ma non la categoria di appartenenza;
- si è visto che il fenomeno di sovrapposizione può interferire con il processo di classificazione: infatti, quando due o più veicoli leggeri si sovrappongono, una volta rilevati, vengono associati alla categoria di quelli pesanti come un unico veicolo, facendo sì che i veicoli leggeri rilevati dal sensore siano inferiori a quelli rilevati in campo da un operatore, e al contempo che il numero dei veicoli pesanti rilevati dal sensore risulti essere superiore o al più uguale a quello rilevato in campo;
- in generale, una migliore corrispondenza tra i dati rilevati dal sensore e quelli rilevati in campo dall'osservatore è stata osservata per le classi di veicoli leggeri e totali. Un maggiore scostamento si ha, invece, per la classe dei veicoli pesanti;
- in generale, tanto più la curva che rappresenta la differenza tra la percentuale di flusso orario rilevato dal sensore durante un intervallo di tempo e quella relativa al flusso rilevato dall'operatore si discosta dall'andamento orizzontale, tanto minore è la precisione e l'affidabilità di rilievo del sensore. Questo è stato riscontrato maggiormente per la classe dei veicoli pesanti, contribuendo ad aumentare il peso di questo fattore anche il numero ridotto di mezzi pesanti circolanti rispetto a quello dei veicoli leggeri;
- dall'analisi dei valori dei coefficienti di correlazione, essendo risultati superiori allo 0.7, si ha che tra i dati rilevati in campo dall'operatore e quelli rilevati dal sensore esiste una correlazione diretta forte e, dunque, questo permette di avere una misura immediata dell'affidabilità di rilievo del sistema di monitoraggio automatico realizzato.

Per quanto riguarda, invece, il confronto tra i dati stimati dal modello e quelli rilevati in campo, è stato ottenuto che:

- il modello di simulazione è in grado di riprodurre valori di flussi di traffico abbastanza vicini a quelli che realmente transitano sulla rete, nonostante le fasce orarie analizzate siano quelle in corrispondenza delle ore di punta, e quindi soggette, possibilmente, ad una maggiore formazione di code di veicoli e al fenomeno della congestione;
- l'integrazione dei dati rilevati tramite il monitoraggio automatico, mediante la quale viene operata una variazione del valore del flusso uscente relativo agli archi sui quali sono installati i rilevatori e una propagazione di questi sugli archi a monte e a valle, e l'importazione dei floating car data, per la correzione dei valori di velocità, permettono di ridurre l'errore causato dall'eventuale sottostima dei valori dei flussi da parte del modello;

- la curva di affidabilità, ottenuta diagrammando i valori delle differenze tra la percentuale di flusso orario stimato dal modello durante una simulazione e la percentuale di flusso orario rilevato in campo dall'operatore, riferita sempre allo stesso intervallo, presenta degli scostamenti dall'andamento orizzontale poco rilevanti, ciò a significare un buon funzionamento del modello di assegnazione;
- i coefficienti di correlazione calcolati risultano sono tutti superiori allo 0.3 e, dunque, la correlazione tra le due serie di dati, cioè tra i flussi rilevati in campo e quelli stimati dal modello è di tipo diretta, e a seconda del valore assunto, variabile tra forte e moderata.

Infine, è stata proposta una metodologia per la stima della Travel Time Reliability (TTR) di una rete di trasporto estesa a differenti livelli di aggregazione, utilizzando i dati di traffico storici provenienti dal rilievo dei sensori radar e i dati real-time ottenuti dal modello di simulazione, mediante l'analisi e il confronto di differenti misure della TTR.

Le variabili statistiche utilizzate per quantificare la TTR della rete sono state le seguenti: deviazione standard, travel time window, buffer index, buffer time e il planning time index. In generale, la determinazione di opportuni indici statistici rappresenta una valida strategia per ottenere un incremento dei livelli di affidabilità della rete e per l'individuazione di migliori strategie di gestione da adottare.

Il lavoro svolto nell'ambito di questa analisi ha portato alla luce di risultati pratico/concettuali e ad alcuni spunti su cui è possibile soffermare ulteriormente l'attenzione della ricerca, che, per grandi linee, sono riportati qui di seguito:

- la dinamica intraperiodale che caratterizza la forma tipica dell'andamento del flusso è più accentuata durante le ore di punta e in corrispondenza dei giorni feriali, quando si registrano maggiori variazioni della domanda oraria nel corso della giornata (analisi intra-giornaliera);
- all'interno delle reti di trasporto urbane esiste stretta corrispondenza tra i valori dei tempi di percorrenza e i valori dei flussi veicolari: infatti, all'aumentare dei flussi si ha un aumento anche dei tempi di percorrenza che, in generale, manifestano un incremento in corrispondenza delle ore di punta;
- dall'analisi di percorso, si può affermare che un percorso, seppur più breve (in termini di lunghezza di percorso), se caratterizzato da un'elevata differenza tra il tempo effettivo e il tempo medio di percorrenza, risulta meno affidabile di un altro percorso più lungo, caratterizzato da una differenza minore;
- i valori degli indici statistici di deviazione standard e buffer index possono essere considerati immediati indicatori dell'affidabilità di una rete. In particolare si ha che, quando il tempo di percorrenza di un itinerario presenta un'elevata variabilità, il valore della deviazione standard è anch'esso elevato e quindi l'affidabilità è bassa. Viceversa, quando gli spostamenti richiedono all'incirca lo stesso tempo, allora la

deviazione standard è bassa e l'affidabilità elevata; inoltre, quando il valore del buffer index tende a diminuire, la TTR aumenta;

- la deviazione standard dei tempi di percorrenza risulta essere inversamente proporzionale all'affidabilità di una rete: infatti, minore è il suo valore e, soprattutto la sua variabilità, maggiore sarà l'affidabilità dei tempi di percorrenza;
- la durata del tempo di percorrenza di un percorso e la sua affidabilità sono grandezze linearmente indipendenti: si è registrato in alcuni casi, infatti, che itinerari che presentano un tempo di percorrenza più elevato sono, invece, caratterizzati da migliori prestazioni in termini di affidabilità;
- esiste una stretta correlazione tra il fenomeno della congestione e l'entità della TTR. Infatti, gli scostamenti più elevati tra tempi effettivi di percorrenza e tempi medi si registrano nei giorni feriali, quando il numero di spostamenti dovuti per motivi casa-scuola e casa-lavoro è maggiore. Pertanto, è riconosciuto il fatto che azioni dirette alla riduzione del fenomeno della congestione possono portare un miglioramento dell'affidabilità e, similmente, azioni che mirano all'incremento dell'affidabilità possono ridurre la congestione.

Dunque, è possibile affermare che, in ambito urbano, lo studio dell'affidabilità delle reti di trasporto mediante opportuni indici statistici rappresenta un utile strumento se integrato a supporto delle nuove tecnologie ITS che forniscono un contributo alla gestione e al controllo della mobilità, influenzando in modo significativo nella scelta delle politiche da adottare per la gestione ottimale dei flussi di traffico e ai fini della moderazione dei fenomeni di congestione.

Per quanto attiene agli sviluppi futuri del presente lavoro di ricerca, si ritiene che possa essere fruttuoso l'approfondimento del tema riguardante l'affidabilità delle reti di trasporto. Inoltre, con particolare riferimento al sistema ITS implementato, potrebbe essere oggetto di ulteriore investigazione scientifica l'analisi e il miglioramento della capacità previsiva del modello di simulazione, attraverso un'opportuna ri-calibrazione dei parametri ed attributi che lo caratterizzano. Oltre a ciò, un filone di ricerca particolarmente interessante dal punto di vista scientifico è quello riguardante l'aspetto del monitoraggio ambientale e, dunque, la calibrazione del modello estimativo di emissione e la valutazione della correlazione dei valori emissivi di inquinante con i dati di traffico (flussi, velocità, ecc.).

Infine, tra gli sviluppi operativi futuri della tesi c'è quello di inserire il sistema sviluppato all'interno di un'unica piattaforma integrata, al fine di creare un sistema di infomobilità multimodale aperto ed interoperabile che fornisca informazioni statiche e dinamiche sul trasporto e sulle condizioni del traffico in tempo reale, integrando sistemi informativi di trasporto in un'unica piattaforma che raccolga i dati provenienti da diversi operatori (trasporto pubblico e locale, viabilità e traffico, sosta e parcheggi). Questa Centrale si proporrà, perciò, come obiettivo primario quello dell'interoperabilità tra tutti i sistemi

disponibili per concentrarsi poi sul monitoraggio, controllo, ottimizzazione e implementazione di nuovi servizi attraverso l'impiego di tecnologie ITS, in modo da razionalizzare la rete esistente e porre nella giusta prospettiva i progetti di innovazione ed estensione delle infrastrutture esistenti.



## Riferimenti bibliografici

1. Adamo V., Astarita V., Florian M., Mahut M., Wu J. (1999). *Modeling the spillback of congestion in link based dynamic network loading models: A simulation model with application*. In Transportation and Traffic Theory, ed. A. Ceder, Pergamon-Elsevier, New York, USA, pp. 555-573.
2. Air pollutant emission inventory guidebook. EMEP/EEA (2013).
3. Antoniola M. (2016) Centrale della Mobilità di Torino. Aspetti tecnologici e di governance. Roma, 11 luglio 2016.
4. Ban X. J., Bayen M. (2009). *Optimal Sensor Placement for Freeway Travel Time Estimation*. Springer Science Transportation and Traffic Theory. 18th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT), Honk Hong, July 2009.
5. Barcelo J. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation*, Springer, New York, USA.
6. Ben-Akiva M., Bierlaire M., Bottom J., Koutsopoulos N., Mishalani R. (1997). *Development of a route guidance generation system for real-time application*. Proceedings of the 8th IFAC symposium on transportation systems, Chania, Greece.
7. Bianco L., Confessore G., Gentili M. (2006). *Combinatorial aspects of the sensor location*. Springer Science & Francis Journal of Intelligent Transportation Systems, 17 (1), pp. 91-105.
8. Bilancio energetico nazionale (2015). Ministero dello Sviluppo Economico, Statistiche dell'energia. <http://dgsaie.mise.gov.it/dgerm/ben.asp>
9. Brownstone, D.; Small, K.A. 2005. Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstrations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 39 (4): 279–293.
10. Cascetta E. (1998). *Teoria e metodi dell'ingegneria dei sistemi di trasporto*. UTET, Torino, Italia.
11. Cascetta E. (2001). *Transportation systems engineering: theory and methods*. Kluwer Academic Press, Dordrecht, The Netherlands.
12. Cascetta E. (2006). *Modelli per i Sistemi di Trasporto – Teoria e Applicazioni*. UTET Università, ISBN 97888600080127.

13. Cascetta E. (2013). Le priorità per la politica dei trasporti. Convegno SIPOTRA, Società italiana di politica dei trasporti, Venezia marittima, 21 ottobre 2013.
14. Censimento permanente della popolazione e delle famiglie. (2015). Istituto nazionale di statistica – ISTAT. [http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCIS\\_POPRES1](http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCIS_POPRES1)
15. Cipriano E.; Fusco G.; Gori S.; Petrelli M. (2006). *Heuristic Methods for the Optimal Location of Road Traffic Monitoring Stations*. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada, 17-20 September 2006.
16. Comunicazione su "ICTSs for Energy Efficiency". (2008). European Commission.
17. CONFETRA (Confederazione nazionale italiana del traffico e dei trasporti). [www.confetra.it](http://www.confetra.it)
18. Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti, Anni 20014/2015, <http://www.mit.gov.it/sites/default/files/media/pubblicazioni/201607/Libro%20CNIT%202014-2015.pdf>
19. Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti. Anni 2014/2015. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2015). <http://www.mit.gov.it/comunicazione/pubblicazioni/CNIT-2014-2015>
20. Dalla Chiara B., Bifulco G., Fusco G., Barabino B., Corona G., Rossi R., Studer L. (2013). ITS nei trasporti stradali, tecnologie, metodi ed applicazioni. EGAF.
21. Decisione n. 1982/2006/CE concernente il programma specifico "Cooperazione" che attua il settimo programma quadro della Comunità europea per le attività di ricerca, sviluppo tecnologico e dimostrazione (2007-2013). Parlamento europeo e Consiglio del 19/12/2006.
22. Decreto interministeriale 39 del 1 febbraio 2013 – "Diffusione dei sistemi di trasporto intelligenti (ITS) in Italia".
23. Decreto Ministeriale del 15 aprile 1994 - Norme tecniche in materia di livelli e di stati di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane, ai sensi degli articoli 3 e 4 del D.P.R. 24 maggio 1988, n. 203, e dell'art. 9 del D.M. 20 maggio 1991.
24. Decreto interministeriale 446/14 – Ministero delle infrastrutture e dei trasporti organo nazionale deputato all'adozione del "Piano nazionale per lo sviluppo dei sistemi ITS".
25. Dial R.B. (2006). *A path-based user-equilibrium traffic assignment algorithm that obviates path storage and enumeration*. Transportation Research B 40, pp.917-936.
26. Direttiva 2010/40/UE (7 luglio 2010), "Quadro generale per la diffusione dei sistemi di trasporto intelligenti nel settore del trasporto stradale e nelle interfacce con altri modi di trasporto".

- 
27. Ehlert A., Bell M. G. H., Grosso S. (2006). *The optimization of traffic count locations in road networks*. Elsevier Transportation Research Part B: Methodological, volume n. 40, pp. 460-479
  28. EU Energy and Transport in Figures - Statistical Pocket book. (2016). European Commission.
  29. European Commission (17 dicembre 2013), "Mobilising Intelligent Transport Systems for EU cities", SWD (2013) 527 final.
  30. Fei X., Mahamassani H. S., Eisenman S. M. (2007). *Sensor Coverage and Location for Real-Time Traffic Prediction in Large-Scale Networks*. Elsevier Transportation Research Part B: Methodological, volume n. 40, pp. 460-479.
  31. Friesz T., Bernstein D., Smith T., Tobin R., Wie B. (1993). *A variational inequality formulation of the dynamic network user equilibrium problem*. Operations Research 41, pp. 179-191.
  32. Gentile, G. (2008). *The General Link Transmission Model for dynamic network loading and a comparison with the DUE algorithm*. 2nd International Symposium on Dynamic Traffic Assignment, Leuven, Belgium.
  33. Gentile G. (2010a). *Traffic assignment: can dynamic models offer more?*. In Proceedings of Networks for Mobility, 5th International Symposium, ed.s U. Martin et al., FOVUS, Stuttgart, Germany, pp. 1-5.
  34. Gentile G. (2014). *Local User Cost Equilibrium: a bush-based algorithm for traffic assignment*. Transportmetrica A: Transport Science 10, 15-54.
  35. Gentile G., Immers L.G.H., Tampere C.M.J., Viti F. (2010). *The General Link Transmission Model for Dynamic Network Loading and a comparison with the DUE algorithm, in New developments in transport planning: advances in Dynamic Traffic Assignment*. Edward Elgar Publishing, Transport Economics, Management and Policy Series, MA, USA, ISBN: 978-1848449633
  36. Gentile G., Lunardon D., Arenella A., Doninelli T. (2010). *A new methodology for automatic building of dynamic models for simulation of road transport networks. SIDT scientific seminar 2010 "External costs of transport systems: theory and applications"*, Rome, Italy.
  37. Gentile, G.; Meschini, L. (2011). *Using dynamic assignment models for real-time traffic forecast on large urban networks*. 2nd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, Leuven, Belgium.
  38. Gentile G., Meschini L., Papola N. (2005): *Macroscopic arc performance models with capacity constraints for within-day dynamic traffic assignment*. Elsevier Transportation Research Part B: Methodological, volume n. 39, pp. 319-338, ISSN: 0191-2615.
  39. Gentile G., Meschini L., Papola N. (2007). *Spillback congestion in dynamic traffic assignment: a macroscopic flow model with time-varying bottlenecks*. Elsevier

- Transportation Research Part B: Methodological, volume n. 41, pp. 1114-1138, ISSN: 0191-2615.
40. Gentile G., Nöekel K., Meschini L. (2006). *Time and space discretization in dynamic traffic assignment models*. In Proceedings of the First International Symposium on Dynamic Traffic Assignment – DTA 2006, Leeds, England.
  41. Gentili M.; Mirchandani P. (2011). Survey of models to locate sensors to estimate traffic flows. 90th TRB Annual Meeting, 23-27 January 2011.
  42. Heydecker B., Addison J. (1998). *Traffic models for dynamic traffic assignment*. In *Transport networks: recent methodological advances*, ed M.G.H. Bell, Pergamon-Elsevier, Oxford, UK, pp. 35-49.
  43. Helbig D. (1996). *Derivation and empirical validation of a refined traffic flow model*. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 233, Issues 1-2, pp. 253-282.
  44. Horn M. E. T. (2004). *Procedures for planning multi-leg journeys with fixed-route and demand-responsive passenger transport services*. Elsevier Transportation Research Part C: Emerging Technologies, volume n. 12, pp. 33-55.
  45. Horowitz H. L. (1982), *Air quality analysis for urban transportation planning*. MIT press, Cambridge Massachusetts.
  46. Incidenti stradali in Italia. (2015). Istituto nazionale di statistica – ISTAT. <https://www.istat.it/it/archivio/192204>
  47. “Intelligent Transport Systems – Intelligence at the Service of Transport Networks”. (2003). European Commission.
  48. Jayakrisham R., Mahmassani H., Hu T. (1994). *An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks*. Transportation Research C 2, pp. 129-147.
  49. Jost et al. (1992) *Emission and fuel consumption modelling based on continuous measurement*. DRIVE project, del n°12 maggio 1992.
  50. Kenyon S., Lyons G. (2003). *The value of integrated multimodal traveller information and its potential contribution to modal change*. Elsevier Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, volume n. 6, pp. 1-21.
  51. Kramers A. (2014). *Designing next generation multimodal traveler information systems to support sustainability-oriented decisions*. Elsevier Environmental Modelling e Software, volume n. 56, pp. 83-93.
  52. Libro verde 2007. – Verso una nuova cultura per la mobilità urbana. Commissione Ce 25 settembre 2007, n. 551.
  53. Lighthill M. J., Whitman G. (1955). *On kinematics waves, II: A theory of traffic flow on long, crowded roads*. Proceedings of The Royal Society of London Ser. A, vol. 4, pp. 229, 317-345, 1955.

- 
54. Lyman, K.; Bertini, R.L., 2008. Using travel time reliability measures to improve regional transportation planning and operations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 1–10.
  55. Mahmassani H. (2001). *Dynamic network traffic assignment and simulation methodology for advanced system management applications*. Kluwer Network and Spatial Economics, volume n. 1, pp. 267-292.
  56. Mahut M., Florian M., Tremblay N. (2008). *Comparison of assignment methods for simulation based dynamic-equilibrium traffic assignment*. Presented at the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, USA.
  57. Medie climatiche. EUROMETEO. <http://www.eurometeo.com/italian/city/>
  58. Mirchandani P., Gentili M. (2012). Locating sensors on traffic networks: Models, challenges and research opportunities. *Elsevier Transportation Research Part C: Technologies*, volume n. 24, pp. 227-255.
  59. Newell G.F. (1980). *Traffic flows in transportation networks*. MIT Press, Cambridge, Mass.
  60. Noland, R.B.; Polak, J.W. 2002. Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues. *Transport Reviews*, 22 (1), pp. 39–54.
  61. Nuzzolo A. (1993), *Simulazione dell'inquinamento da traffico nelle aree urbane*.
  62. Ortúzar J., Armoogum J., J. L. Madre, Potier F. (2011). *Continuous Mobility Surveys: The State of Practice*. *Transport Reviews*, Volume 31, Issue 3, Pages 293-312.
  63. Ortúzar J. de, Willumsen L.G. (1994). *Modelling Transport*. John Wiley and Sons, New York.
  64. Osservatorio sui comportamenti di mobilità degli italiani. AUDIMOB. <http://www.isfort.it/sito/statistiche/Audimob.htm>
  65. Payne H. J. (1971). *Models of freeway traffic and control*. *Simulation Council Proceedings* 1, pp. 51–61, 1971.
  66. Piano di Azione per la Logistica del trasporto merci 2007. European Commission.
  67. Piano di Azione Nazionale sui Sistemi Intelligenti di Trasporto (ITS) (febbraio 2014)
  68. Piano d'Azione sulla Mobilità Urbana (2009). European Commission.
  69. Potts R.B., Oliver R.M. (1972). *Flows in transportation networks*. Academic Press, NewYork.
  70. Ramadurai G., Ukkusuri S. (2011). *B-Dynamic: An efficient algorithm for Dynamic User Equilibrium assignment in activity-travel networks*. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 26, pp. 254-269.

71. Ran B., Boyce D. (1994). *Dynamic urban transportation network models: theory and implications for intelligent vehicle-highway systems*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer-Verlag, New York, USA.
72. Regolamento di esecuzione e di attuazione del nuovo codice della strada – Decreto del Presidente della Repubblica 16 dicembre 1992, n.495 (in Suppl. ord. Alla Gazz. Uff., 28 dicembre 1992, n.303) e successive modificazioni.
73. Relazione popolazione-parco veicolare. Elaborazione Isfort su dati Istat e Urban Transport Benchmarking Iniziative. (2012)
74. Richards P. I. (1956). *Shock waves on the highway*. Operations Research, vol. 4, pp. 42–51, 1956.
75. Sarrate R., Nejari F., Rosich A. (2012). *Sensor Placement for Fault Diagnosis Performance Maximization in Distribution Networks*. Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), Barcelona, July 2012.
76. Sheffi Y. (1985). *Urban transportation networks*. Prentice Hall, Englewood Cliff, N.J.
77. Simon (1981), *the APRAC3 MOBILE1 emission and diffusion modelling package*. U.S. environmental protection agency, luglio 1981.
78. Sistema Tutor. Autostrade per l'Italia e gestito dalla Polizia Stradale, ai sensi dell'Articolo 208 del Decreto Legislativo n. 285/1992. <https://www.autostrade.it/>
79. Smith M., Mounce R. (2011). *A splitting rate model of traffic re-routing and traffic control*. Transportation Research B 45, pp. 1389-1409.
80. Stern A.C. (1976). *Air pollution*. Academic Press, Third edition, volume I. New York.
81. Studi ricerche e statistiche ACI (2014). Automobile Club Italia. <http://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/veicoli-e-mobilita.html>
82. Tartaglia M. (1995). *La simulazione dinamica delle emissioni inquinanti da traffico, quaderni dell'istituto di trasporti n°48, marzo 1995*, Università di Bologna, Bologna.
83. Tartaglia M. (1999). *L'inquinamento dell'aria da traffico stradale. Analisi, calcolo, valutazione*. Bios, Politecnica, ISBN 9788877402707.
84. Unione petrolifera. [www.unionepetrolifera.it](http://www.unionepetrolifera.it)
85. Veicoli e mobilità (2014). Automobile club d'Italia – ACI. <http://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/veicoli-e-mobilita.html>
86. Wang N.; Gentili M.; Mirchandani P. (2012). *A Model to Locate Sensors for Estimating Static OD Volumes given Prior Flow Information*. 91th TRB Annual Meetings, 22-26 January 2012.

87. Wardrop J.G. (1952). *Some theoretical aspects of road traffic research*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, Vol. 1, pp. 325-378.
88. White Paper on Smart Cities as Innovation Ecosystems (Aprile 2012), “*Smart Cities as Innovation Ecosystems Sustained by the Future Internet*”.
89. White Paper on transport 2001 – “La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte”. (2001). European Commission.
90. White Paper on transport 2011– “Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti - Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile”. (2011). European Commission 2011– “*Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti - Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile*”. (2011). European Commission.
91. Yperman I. (2007). *The Link Transmission Model for Dynamic Network Loading*. PhD Thesis, Katholieke University Leuven.

# APPENDICE A

## LOCALIZZAZIONE DELLE SEZIONI DI POSIZIONAMENTO DEI SENSORI

### A.1 Sezione 1 – Viale Presidente Kennedy



Figura A. 1 Tavola sezione 1 – Viale Presidente Kennedy



## A.2 Sezione 2 – Asse dei Servizi – Strada Provinciale 701



Figura A. 2 Tavola sezione 2 – Asse dei Servizi - Strada Provinciale 701

## A.3 Sezione 3 – Strada Statale 192



Figura A. 3 Tavola sezione 3 – Strada Statale 192

## A.4 Sezione 4 – A19 Palermo-Catania



Figura A. 4 Tavola sezione 4 – A19 Palermo-Catania

## A.5 Sezione 5 – Via Palermo



Figura A. 5 Tavola sezione 5 – Via Palermo

## A.6 Sezione 6 – Superstrada Catania-Paternò



Figura A. 6 Tavola sezione 6 – Superstrada Catania-Paternò

## A.7 Sezione 7 – Viale Lorenzo Bolano - Circonvallazione



Figura A. 7 Tavola sezione 7 – Viale Lorenzo Bolano-Circonvallazione

## A.8 Sezione 8 – Via Galermo



Figura A. 8 Tavola sezione 8 – Via Galermo

## A.9 Sezione 9 – Via Santa Sofia



Figura A. 9 Tavola sezione 9 – Via Santa Sofia

## A.10 Sezione 10 – Via Passo Gravina

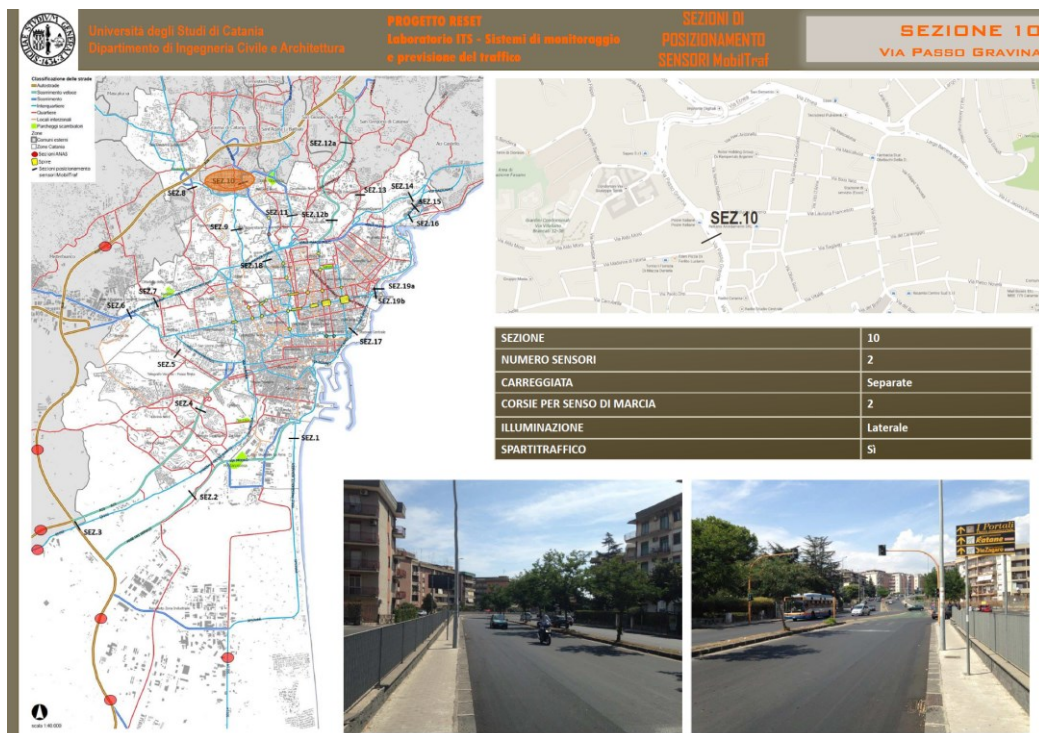


Figura A. 10 Tavola sezione 10 – Via Passo Gravina

## A.11 Sezione 11 – Via Leucatia



Figura A. 11 Tavola sezione 11 – Via Leucatia

## A.12 Sezione 12a-12b – Viale Mediterraneo



Figura A. 12 Tavola sezione 12a – Viale Mediterraneo



Figura A. 13 Tavola sezione 12b – Viale Mediterraneo

### A.13 Sezione 13 – Via Nuovalucello

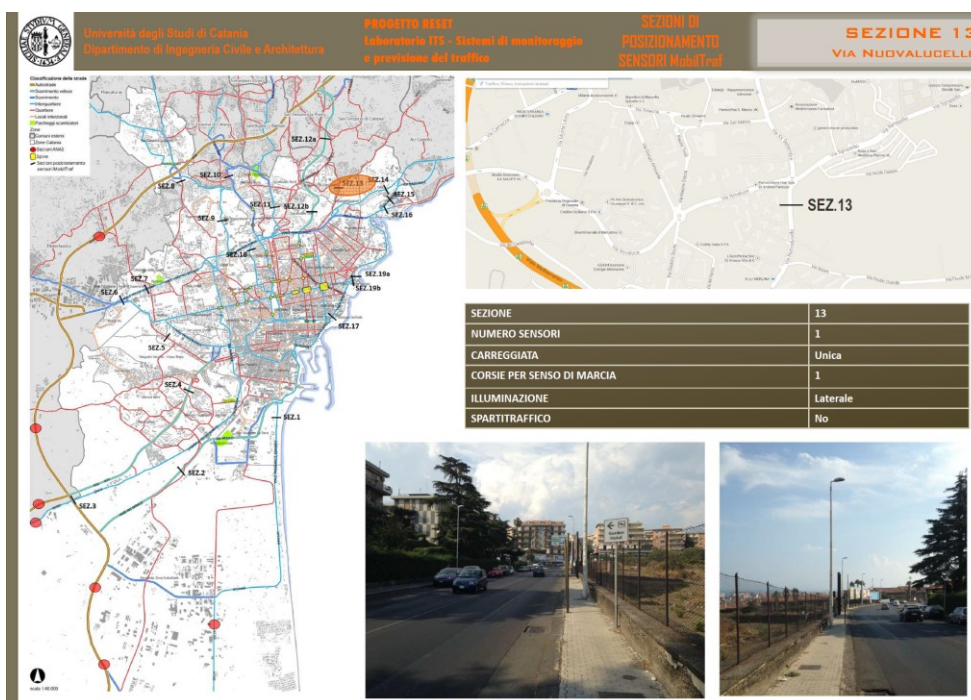


Figura A. 14 Tavola sezione 13 – Via Nuovalucello

### A.14 Sezione 14 – Viale Giuseppe Lainò-Viale Enzo Longo



Figura A. 15 Tavola sezione 14 – Viale Giuseppe Lainò-Viale Enzo Longo

## A.15 Sezione 15 – Via Messina

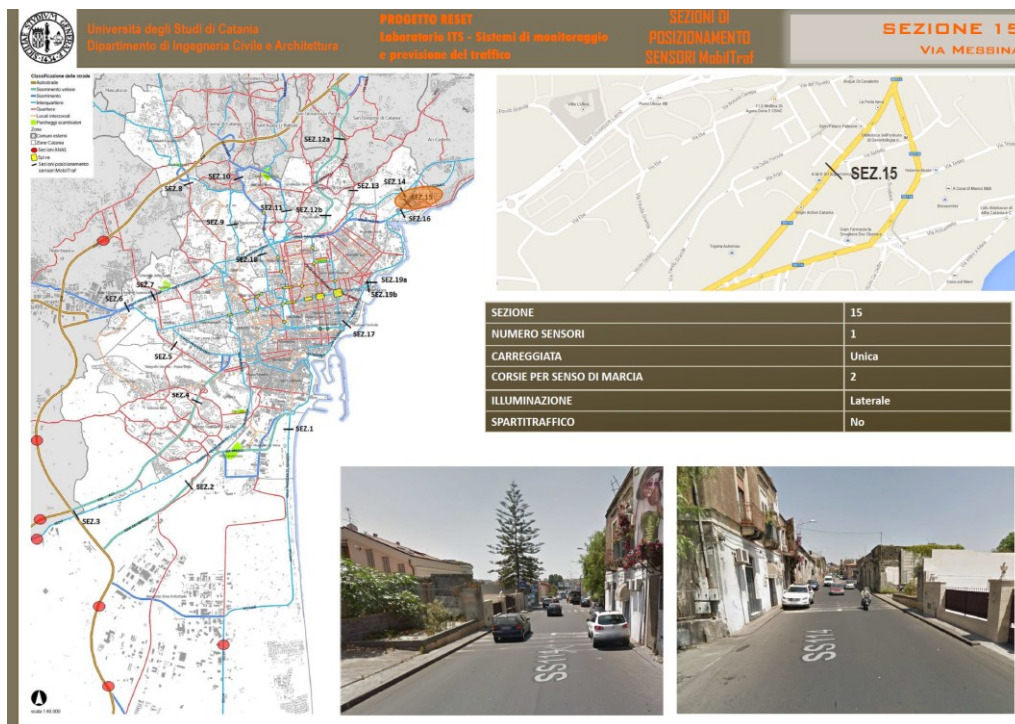


Figura A. 16 Tavola sezione 15 – Via Messina

## A.16 Sezione 16 – Via Acicastello

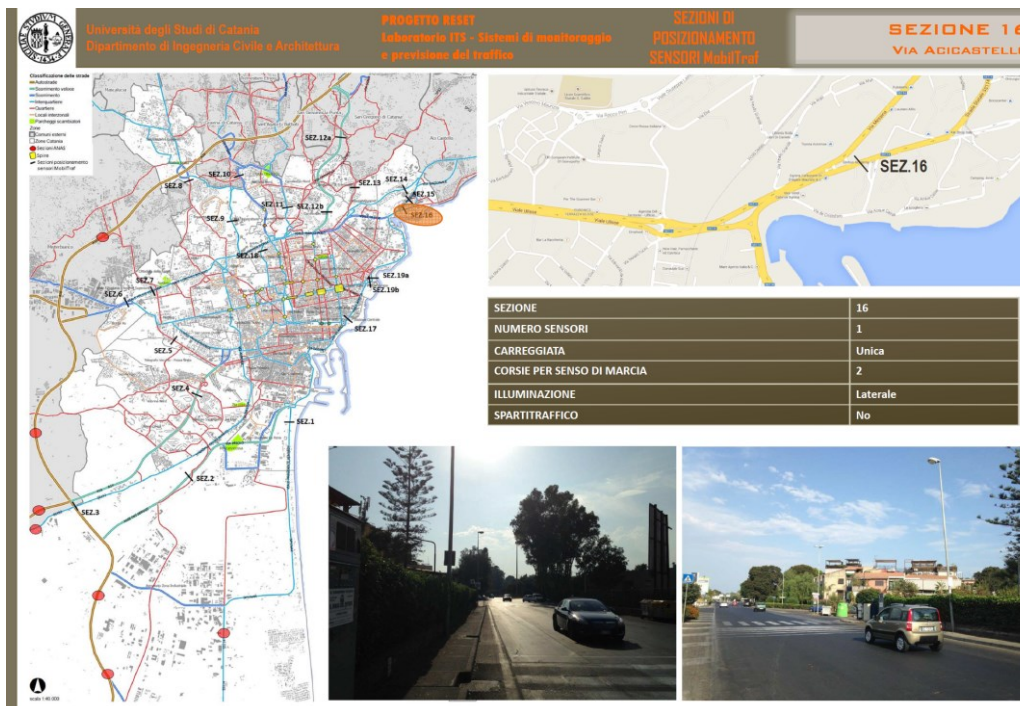


Figura A. 17 Tavola sezione 16 – Via Acicastello



## A.17 Sezione 17 – Viale Africa-SS114



Figura A. 18 Tavola sezione 17 – Viale Africa-SS114

## A.18 Sezione 18 – Via A. Fleming



Figura A. 19 Tavola sezione 18 – Via A. Fleming

## A.19 Sezione 19a-19b – Viale Ruggero di Lauria



Figura A. 20 Tavola sezione 19a – Viale Ruggero di Lauria

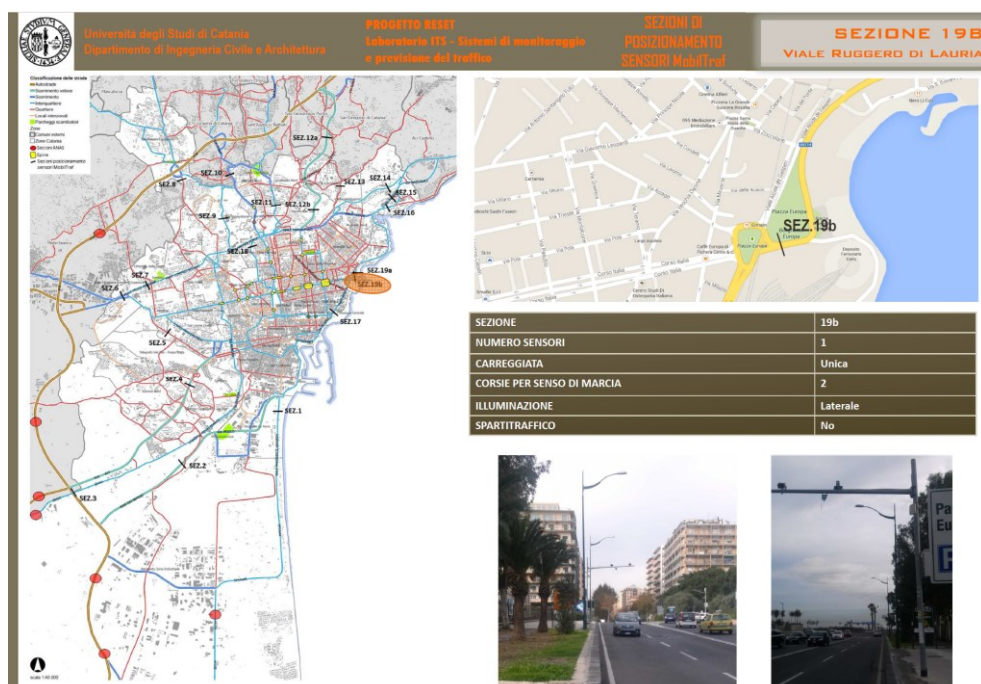


Figura A. 21 Tavola sezione 19b– Viale Ruggero di Lauria

# APPENDICE B

## RISULTATI DELLA VALUTAZIONE DEI FLUSSI DI TRAFFICO RILEVATI E STIMATI

### B.1 Analisi sensore MT14b

#### B.1.1 Sensore MT14b – lunedì 11/05/2015 – 8:00-9:00

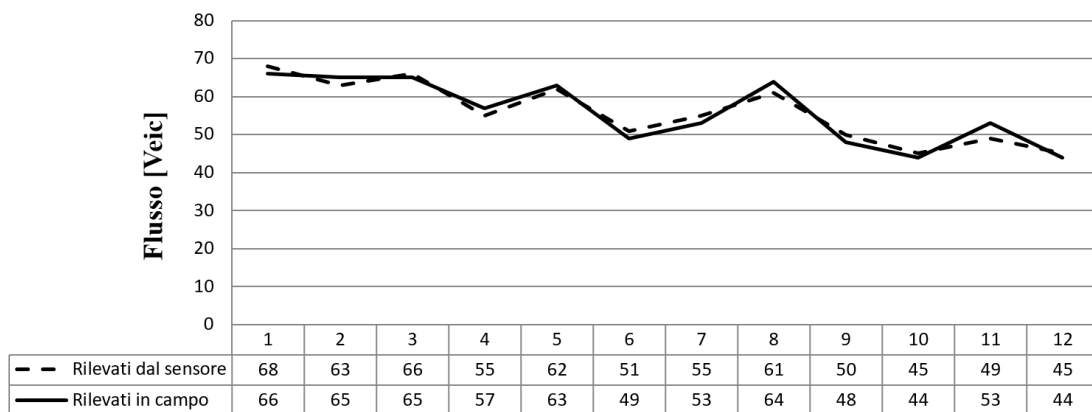


Figura B. 1 Andamento dei veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14b-11/05/2015,8:00-9:00

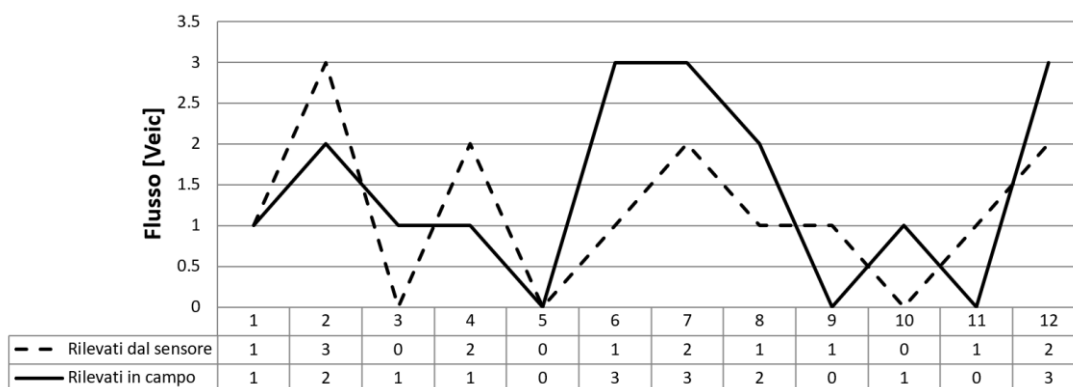


Figura B. 2 Andamento dei veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14b-11/05/2015, 8:00-9:00

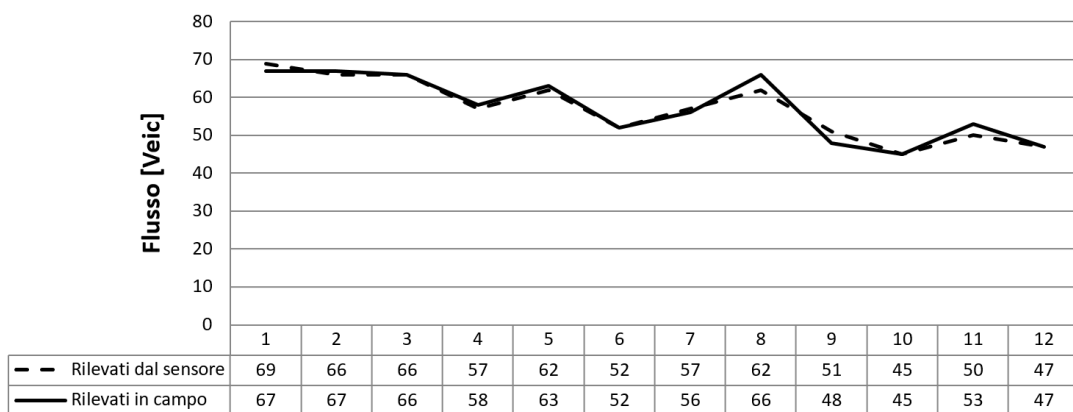


Figura B. 3 Andamento dei veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14b-11/05/2015, 8:00-9:00

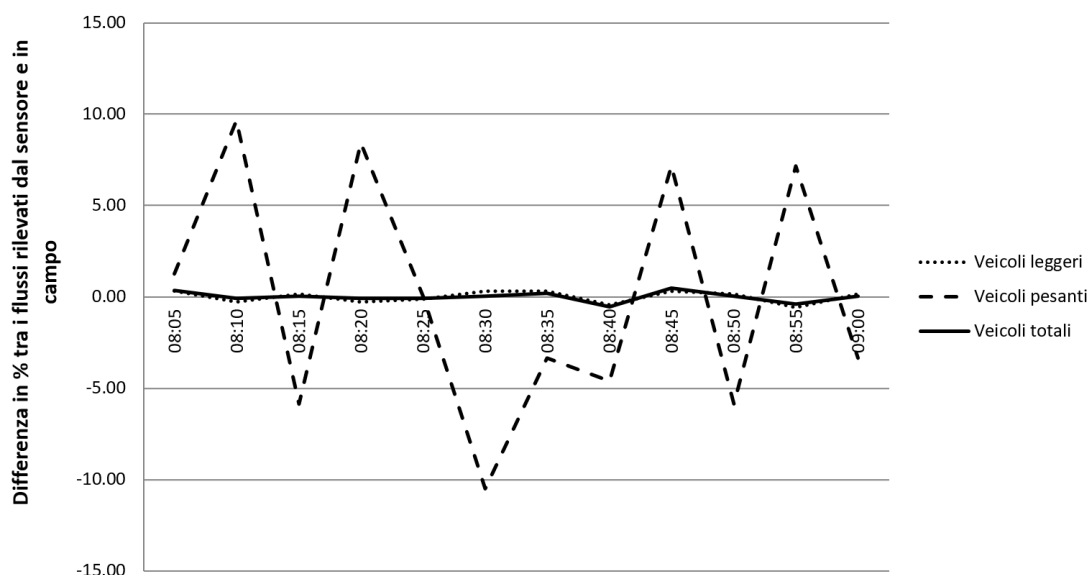


Figura B. 4 Analisi di affidabilità- MT14b-11/05/2015, 8:00-9:00

Tabella B. 1 Coefficienti – MT14b-11/05/2015, 8:00-9:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.144
	Veicoli pesanti	0.804
	Veicoli totali	0.141
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.152
	Veicoli pesanti	0.822
	Veicoli totali	0.145
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.886
	Veicoli pesanti	0.471
	Veicoli totali	0.892
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.999
	Veicoli pesanti	0.667
	Veicoli totali	0.999

### B.1.2 Sensore MT14b – lunedì 11/05/2015 – 13:00-14:00

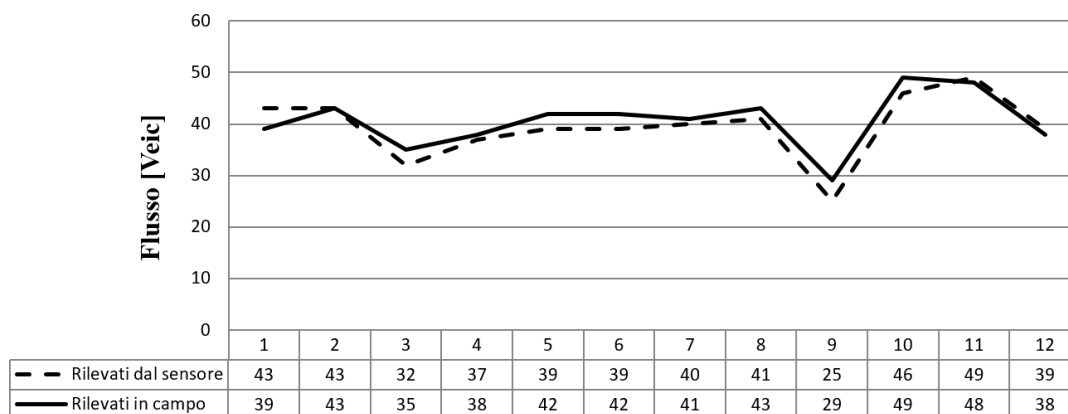


Figura B. 5 Andamento dei veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14b-11/05/2015,13:00-14:00

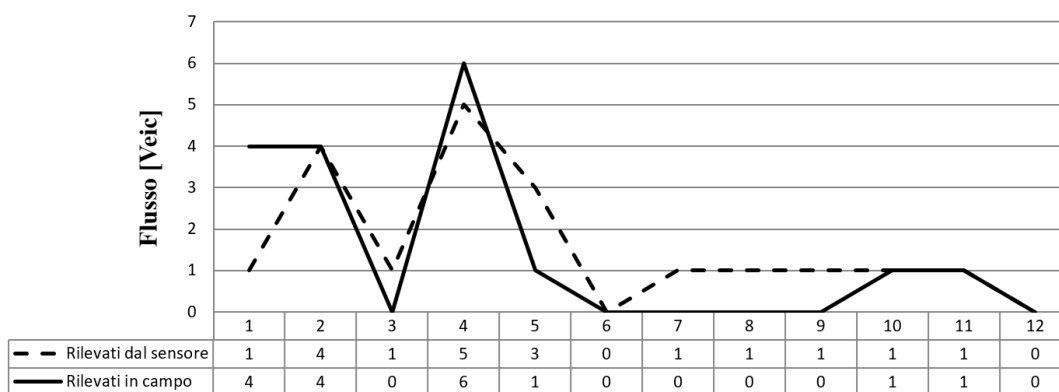


Figura B. 6 Andamento dei veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14b-11/05/2015, 13:00-14:00

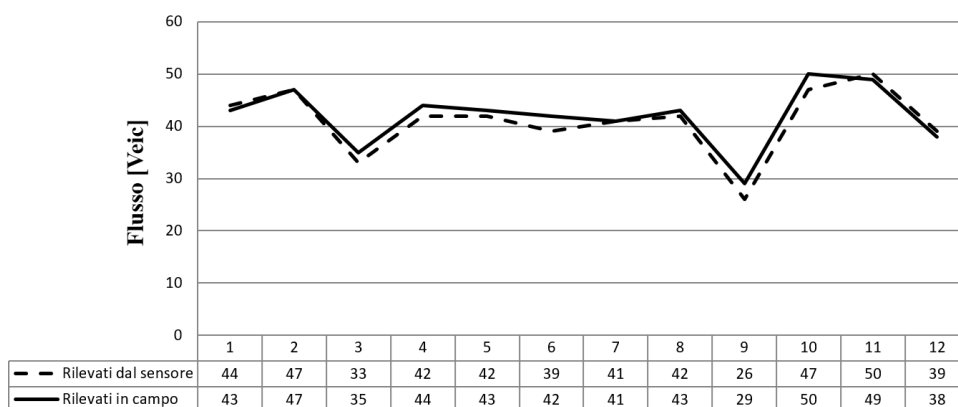


Figura B. 7 Andamento dei veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14b-11/05/2015, 13:00-14:00

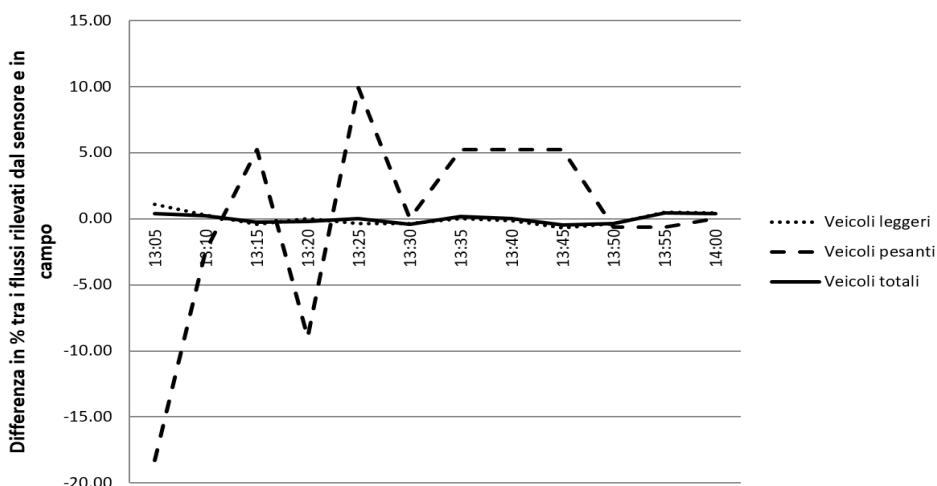


Figura B. 8 Analisi di affidabilità- MT14b-11/05/2015, 13:00-14:00

Tabella B. 2 Coefficienti – MT14b-11/05/2015, 13:00-14:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.159
	Veicoli pesanti	0.988
	Veicoli totali	0.158
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.134
	Veicoli pesanti	1.458
	Veicoli totali	0.140
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.853
	Veicoli pesanti	0.724
	Veicoli totali	0.890
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.997
	Veicoli pesanti	0.747
	Veicoli totali	0.999

### B.1.3 Sensore MT14b – lunedì 11/05/2015 – 19:00-20:00

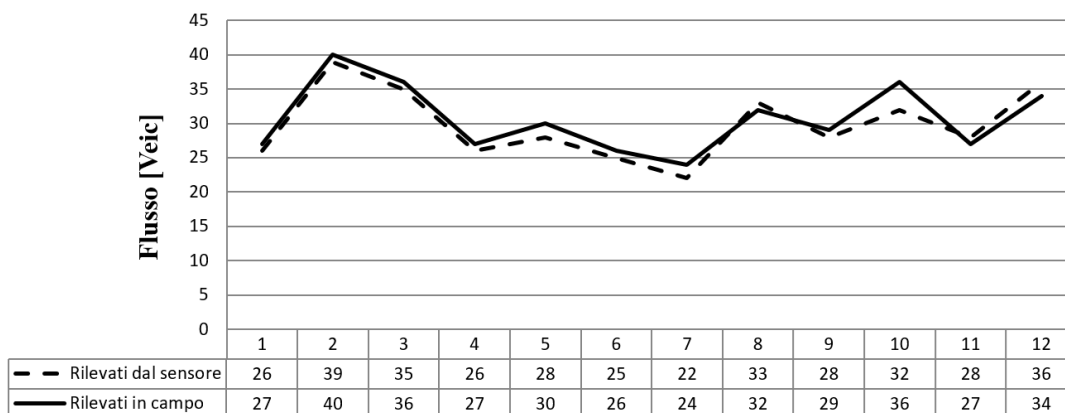


Figura B. 9 Andamento dei veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14b-11/05/2015,19:00-20:00

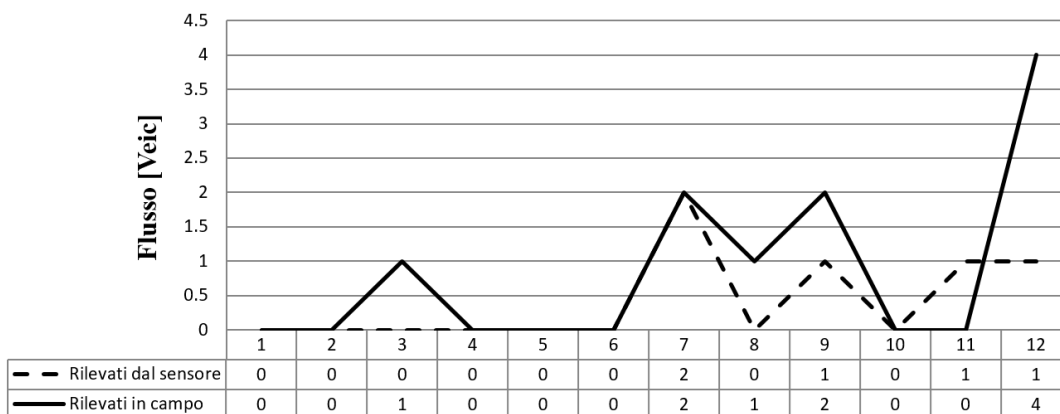


Figura B. 10 Andamento dei veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14b-11/05/2015,19:00-20:00

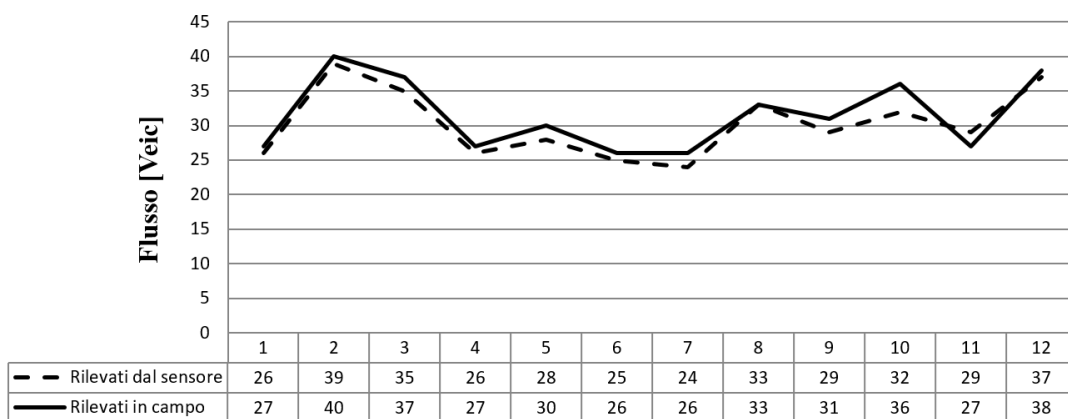


Figura B. 11 Andamento dei veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14b-11/05/2015, 19:00-20:00

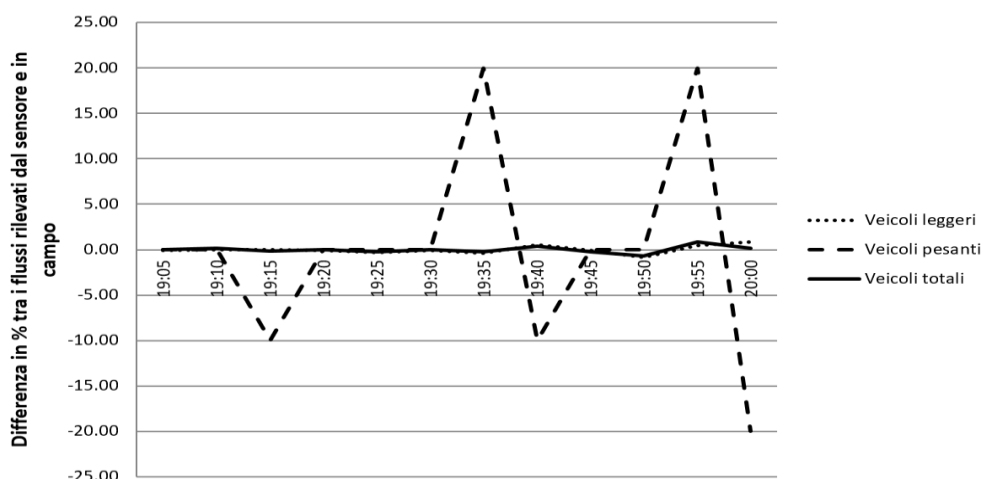


Figura B. 12 Analisi di affidabilità– MT14b-11/05/2015, 19:00-20:00

Tabella B. 3 Coefficienti – MT14b-11/05/2015, 19:00-20:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.171
	Veicoli pesanti	1.521
	Veicoli totali	0.163
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.161
	Veicoli pesanti	1.521
	Veicoli totali	0.163
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.872
	Veicoli pesanti	0.574
	Veicoli totali	0.881
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.997
	Veicoli pesanti	0.549
	Veicoli totali	0.998

### B.1.4 Sensore MT14b – giovedì 14/05/2015 – 8:00-9:00

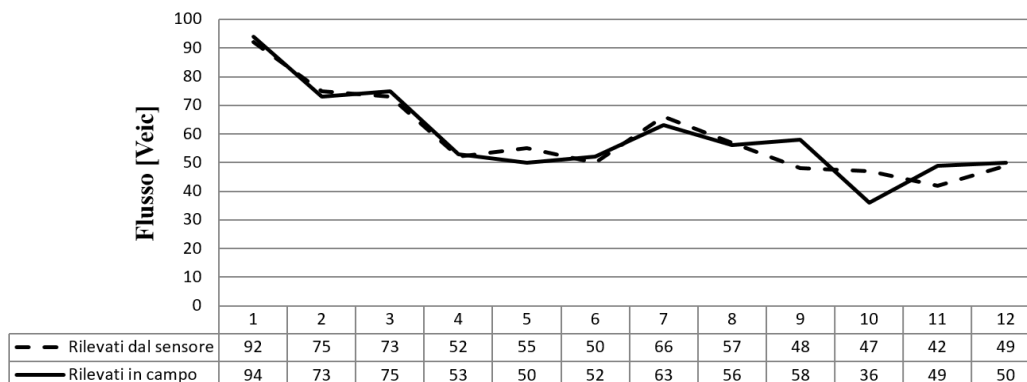


Figura B. 13 Andamento dei veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14b-14/05/2015,8:00-9:00



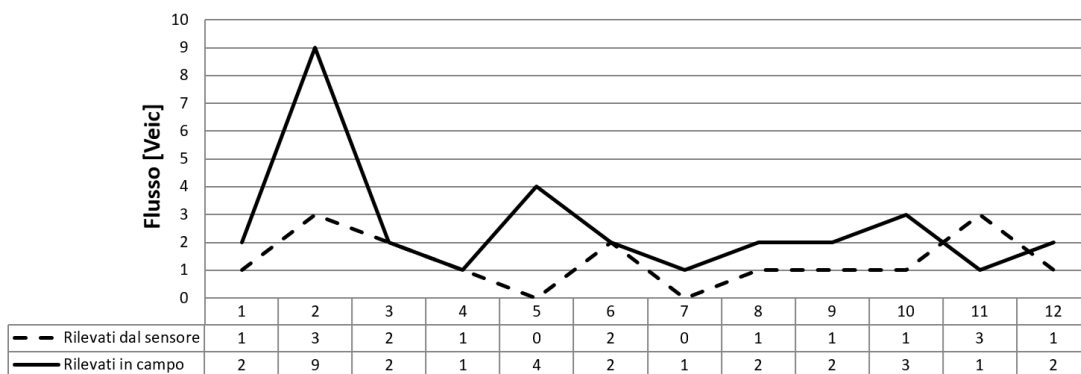


Figura B. 14 Andamento dei veicoli pesanti rilevati nei 5 min. MT14b-14/05/2015, 8:00-9:00

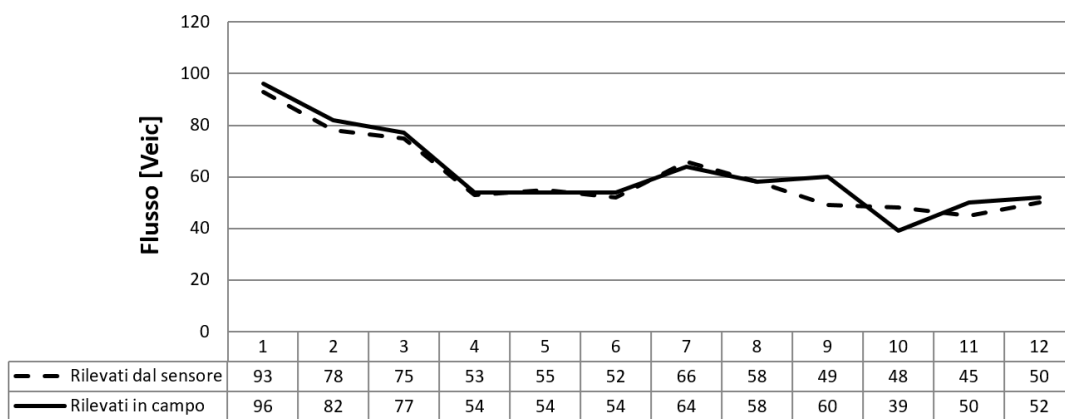


Figura B. 15 Andamento dei veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14b-14/05/2015, 8:00-9:00

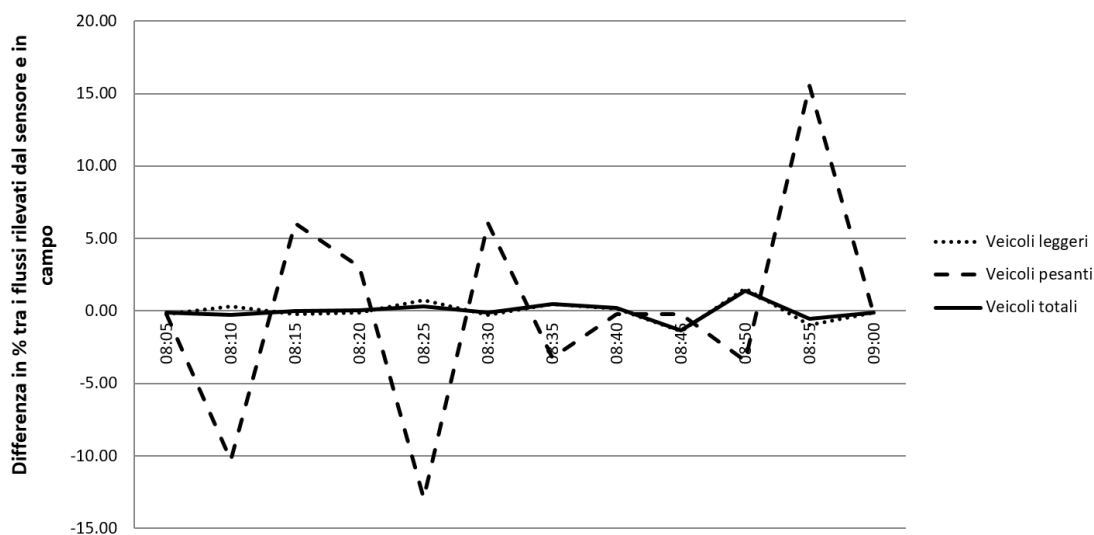


Figura B. 16 Analisi di affidabilità- MT14b-14/05/2015, 8:00-9:00

Tabella B. 4 Coefficienti – MT14b-14/05/2015, 8:00-9:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.251
	Veicoli pesanti	0.739
	Veicoli totali	0.246
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.259
	Veicoli pesanti	0.849
	Veicoli totali	0.257
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.858
	Veicoli pesanti	0.334
	Veicoli totali	0.876
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.993
	Veicoli pesanti	0.587
	Veicoli totali	0.995

### B.1.5 Sensore MT14b – giovedì 14/05/2015 – 13:00-14:00

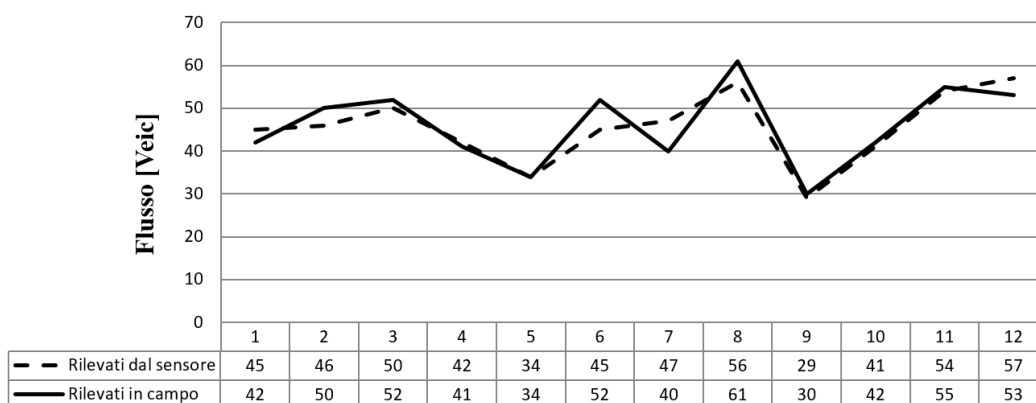


Figura B. 17 Andamento dei veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14b-14/05/2015,13:00-14:00

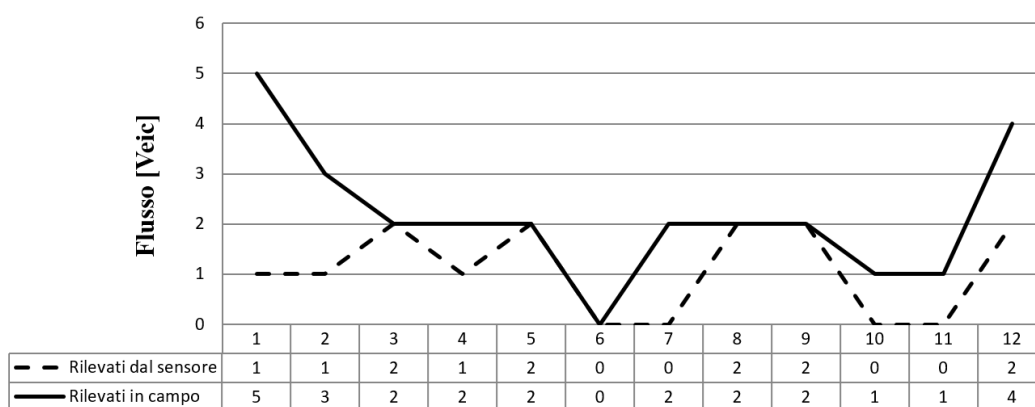


Figura B. 18 Andamento dei veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14b-14/05/2015, 13:00-14:00

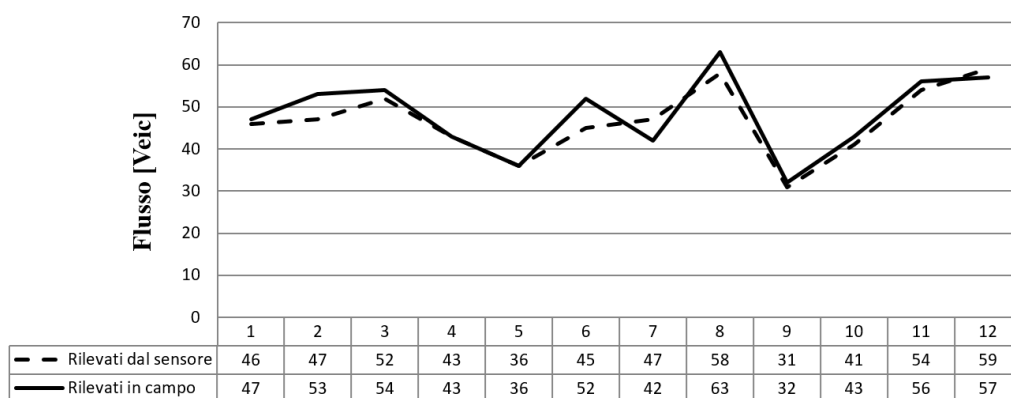


Figura B. 19 Andamento dei veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14b-14/05/2015, 13:00-14:00

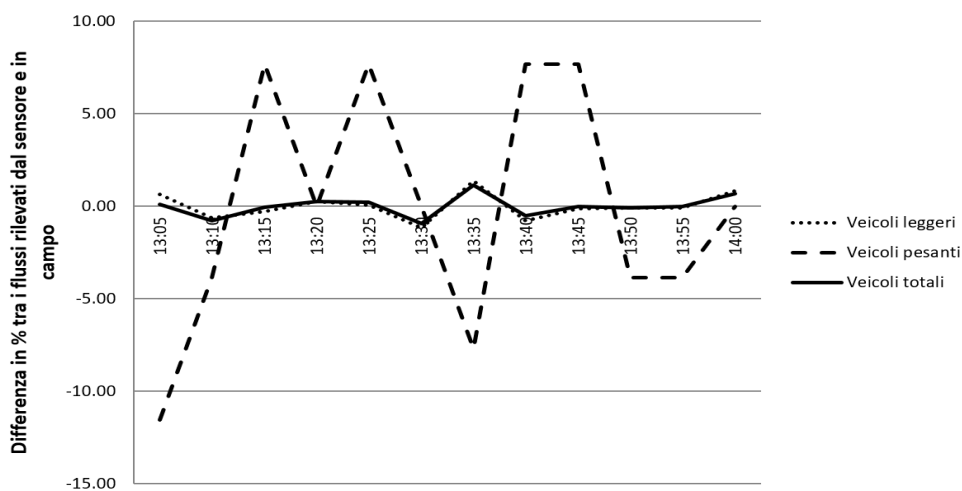


Figura B. 20 Analisi di affidabilità- MT14b-14/05/2015, 13:00-14:00

Tabella B. 5 Coefficienti – MT14b-14/05/2015, 13:00-14:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.184
	Veicoli pesanti	0.831
	Veicoli totali	0.180
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.201
	Veicoli pesanti	0.617
	Veicoli totali	0.191
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.830
	Veicoli pesanti	0.404
	Veicoli totali	0.854
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.994
	Veicoli pesanti	0.661
	Veicoli totali	0.996

### B.1.6 Sensore MT14b – giovedì 14/05/2015 – 19:00-20:00

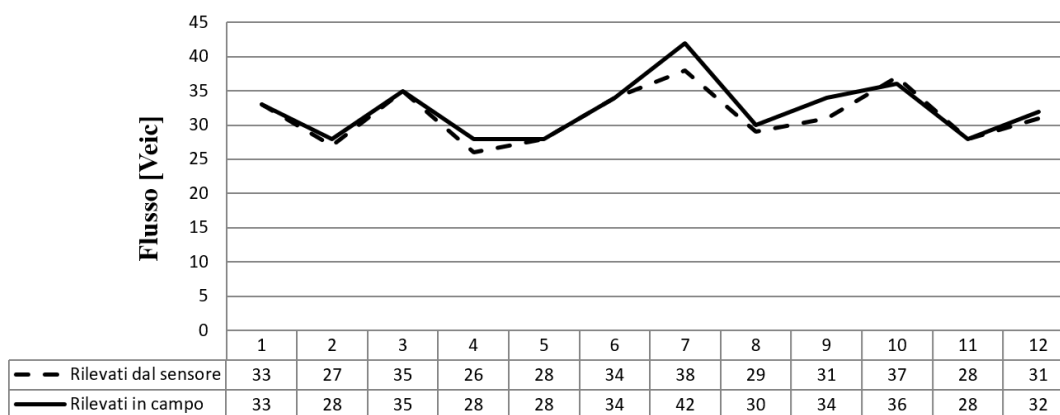


Figura B. 21 Andamento dei veicoli leggeri rilevati nei 5 min MT14b-14/05/2015, 19:00-20:00

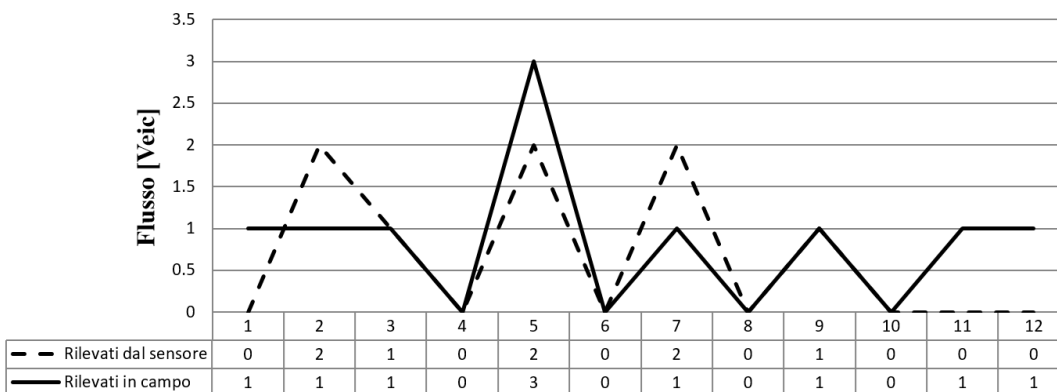


Figura B. 22 Andamento dei veicoli pesanti rilevati nei 5 min MT14b-14/05/2015, 19:00-20:00

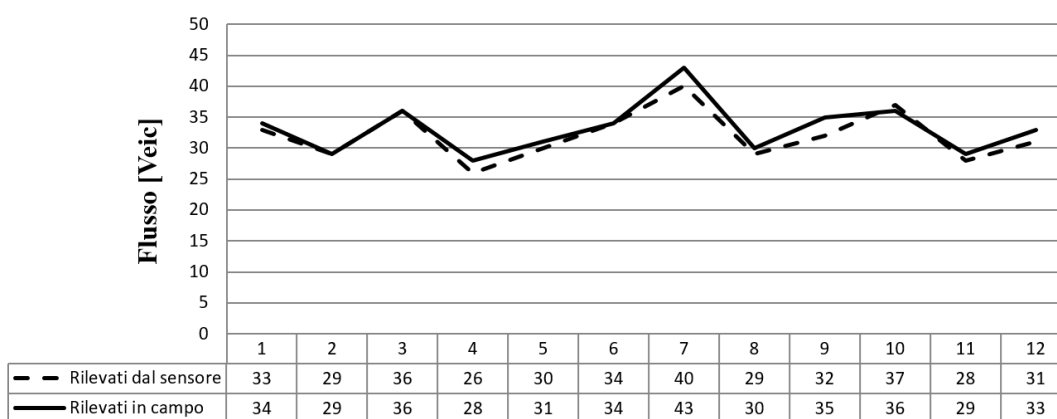


Figura B. 23 Andamento dei veicoli totali rilevati nei 5 min. - MT14b-14/05/2015, 19:00-20:00

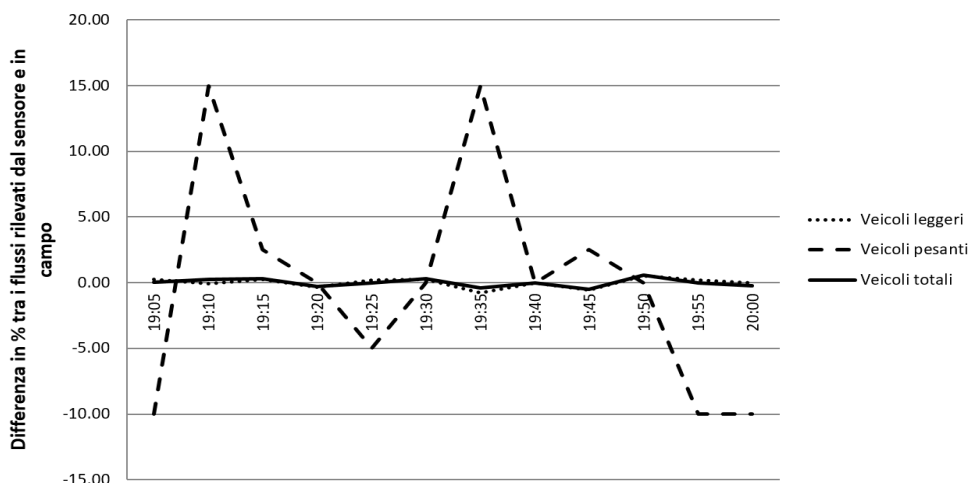


Figura B. 24 Analisi di affidabilità– MT14b-14/05/2015, 19:00-20:00

Tabella B. 6 Coefficienti– MT14b-14/05/2015, 19:00-20:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.127
	Veicoli pesanti	1.002
	Veicoli totali	0.128
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.132
	Veicoli pesanti	1.002
	Veicoli totali	0.127
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.863
	Veicoli pesanti	0.600
	Veicoli totali	0.876
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.998
	Veicoli pesanti	0.643
	Veicoli totali	0.999

### B.1.7 Sensore MT14b – lunedì 18/05/2015 – 8:00-9:00

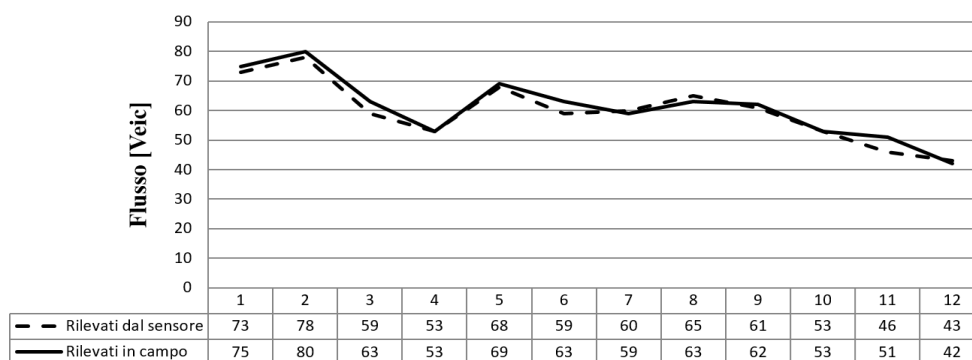


Figura B. 25 Andamento dei veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14b-18/05/2015,8:00-9:00

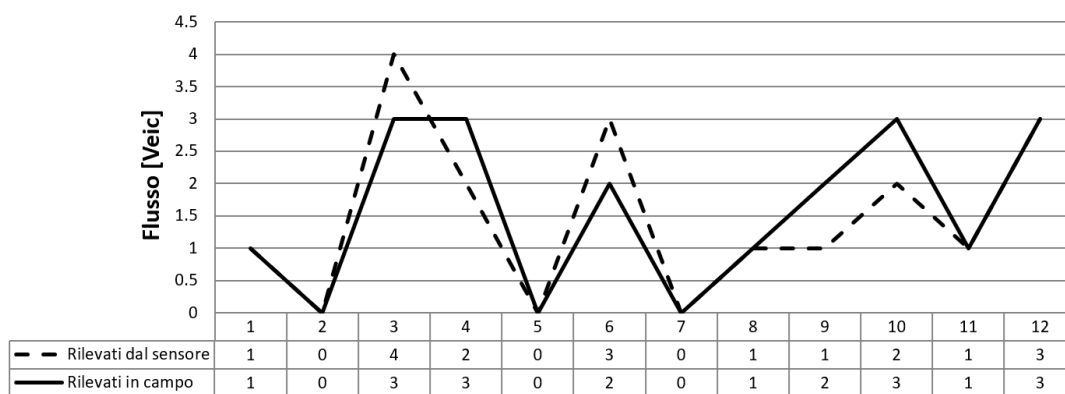


Figura B. 26 Andamento dei veicoli pesanti rilevati nei 5 min. MT14b-18/05/2015, 8:00-9:00

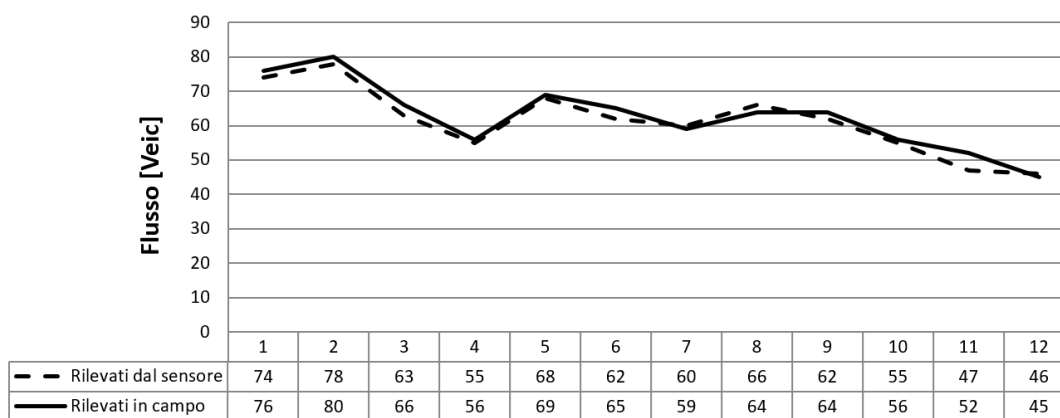


Figura B. 27 Andamento dei veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14b-18/05/2015, 8:00-9:00

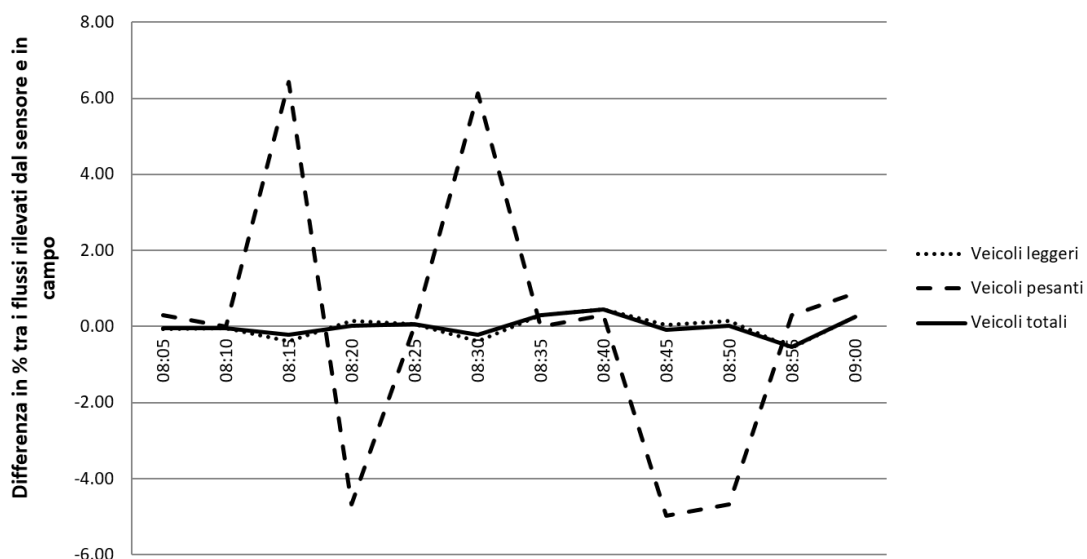


Figura B. 28 Analisi di affidabilità- MT14b-18/05/2015, 8:00-9:00

Tabella B. 7 Coefficienti- MT14b-18/05/2015, 8:00-9:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.172
	Veicoli pesanti	0.876
	Veicoli totali	0.158
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.173
	Veicoli pesanti	0.783
	Veicoli totali	0.157
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.896
	Veicoli pesanti	0.793
	Veicoli totali	0.898
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.999
	Veicoli pesanti	0.895
	Veicoli totali	0.999

### B.1.8 Sensore MT14b – lunedì 18/05/2015 – 13:00-14:00

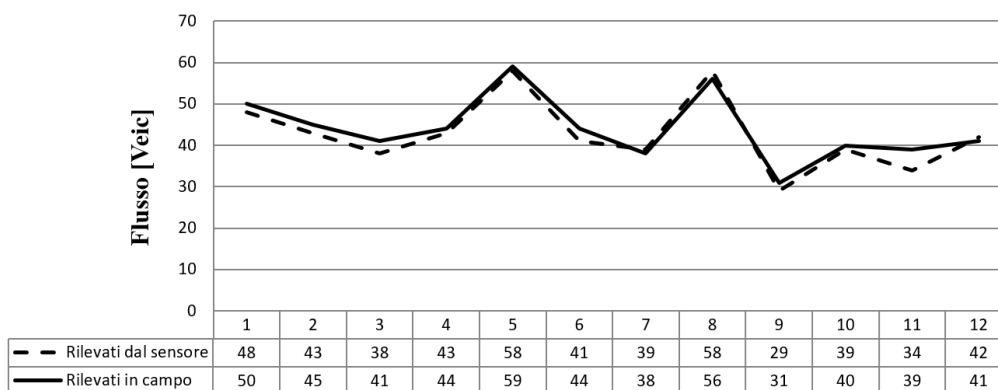


Figura B. 29 Andamento dei veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14b-18/05/2015,13:00-14:00

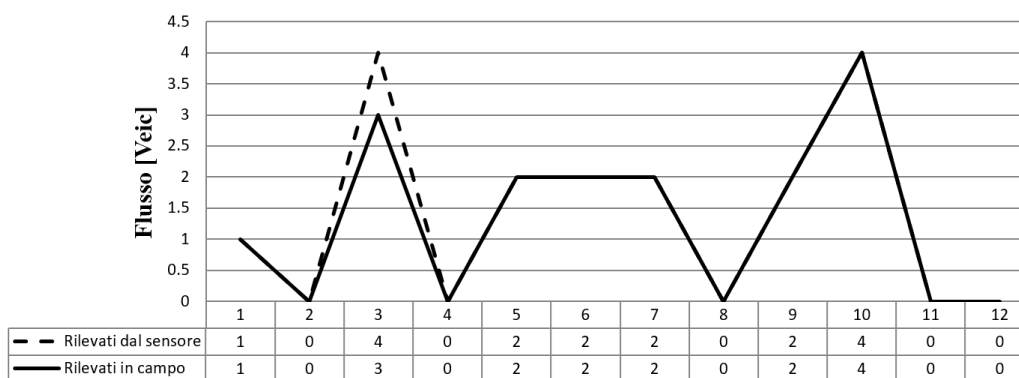


Figura B. 30 Andamento dei veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14b-18/05/2015, 13:00-14:00

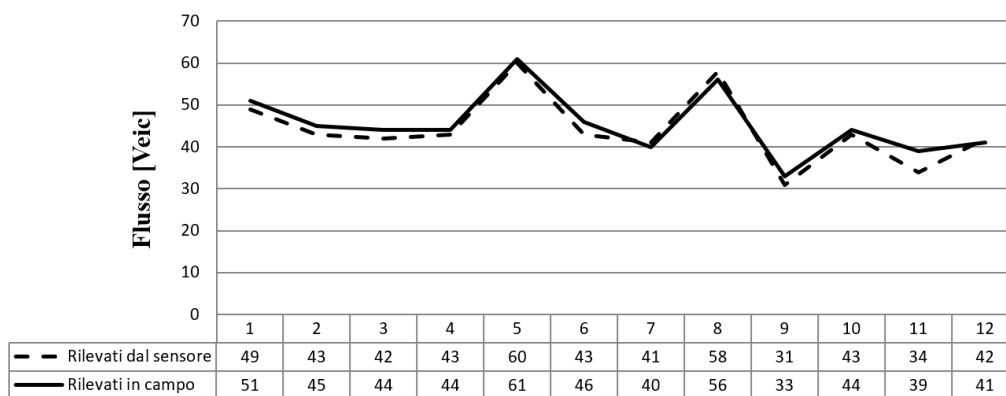


Figura B. 31 Andamento dei veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14b-18/05/2015, 13:00-14:00

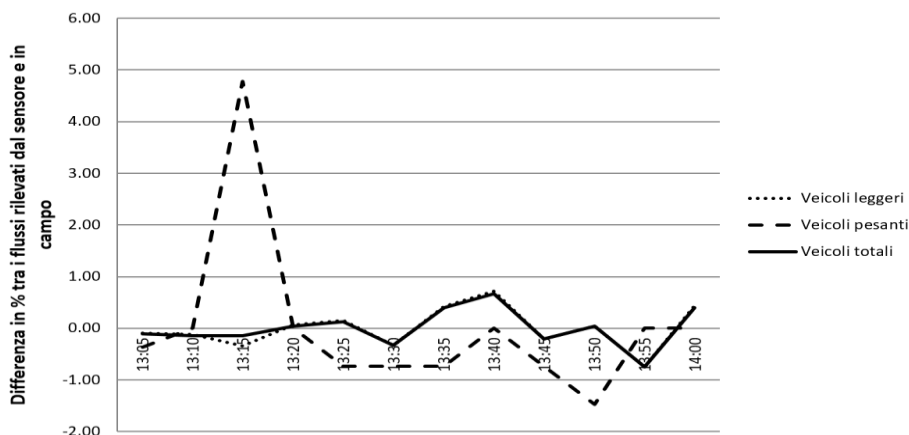


Figura B. 32 Analisi di affidabilità– MT14b-18/05/2015, 13:00-14:00

Tabella B. 8 Coefficienti– MT14b-18/05/2015, 13:00-14:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.201
	Veicoli pesanti	1.062
	Veicoli totali	0.189
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.177
	Veicoli pesanti	1.028
	Veicoli totali	0.168
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.894
	Veicoli pesanti	0.902
	Veicoli totali	0.894
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.998
	Veicoli pesanti	0.984
	Veicoli totali	0.998



### B.1.9 Sensore MT14b – lunedì 18/05/2015 – 19:00-20:00

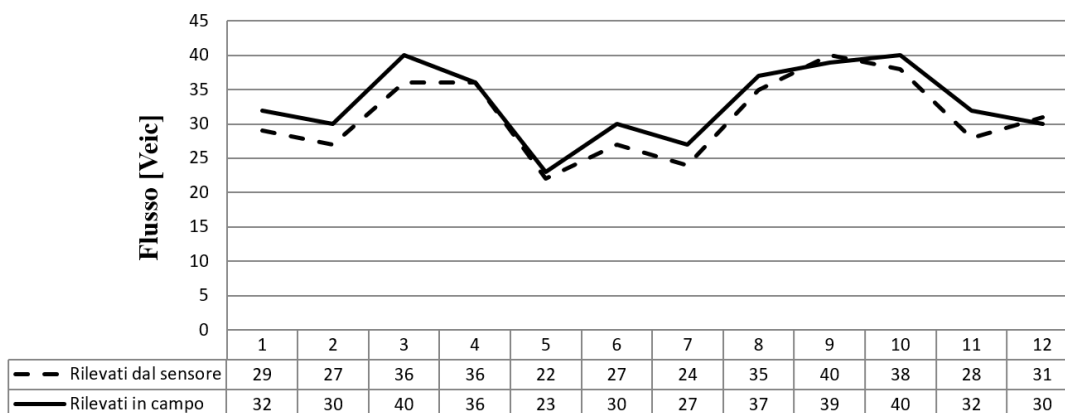


Figura B. 33 Andamento dei veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14b-18/05/2015,19:00-20:00

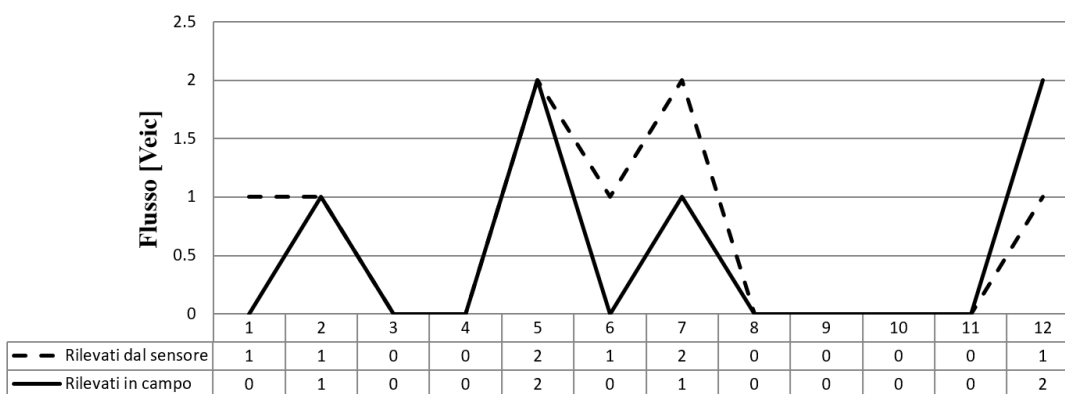


Figura B. 34 Andamento dei veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14b-18/05/2015,19:00-20:00

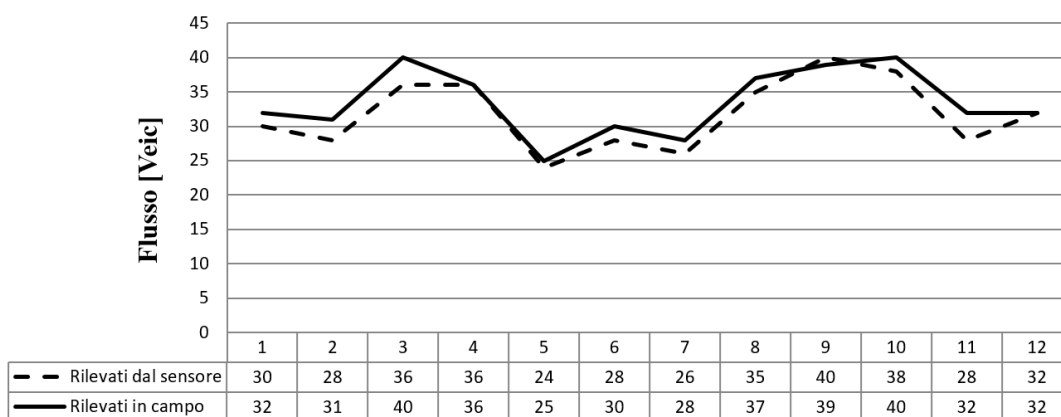


Figura B. 35 Andamento dei veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14b-18/05/2015, 19:00-20:00

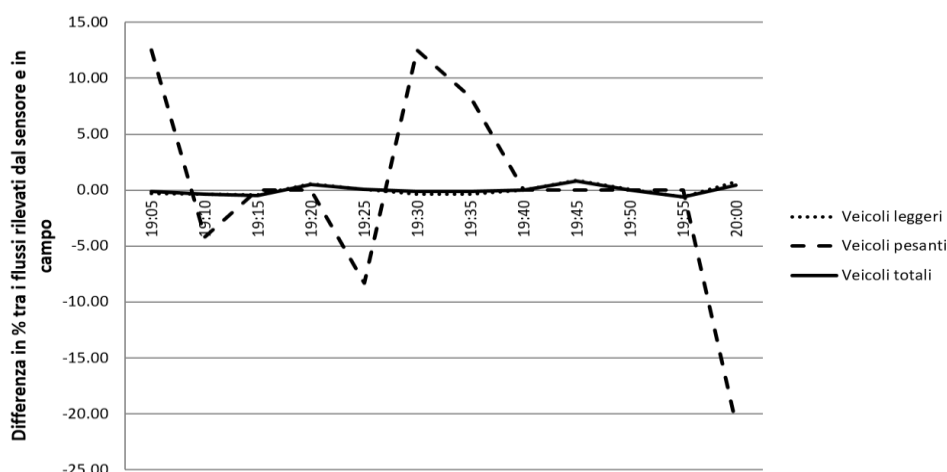


Figura B. 36 Analisi di affidabilità– MT14b-18/05/2015, 19:00-20:00

Tabella B. 9 Coefficienti – MT14b-18/05/2015, 19:00-20:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.187
	Veicoli pesanti	1.595
	Veicoli totali	0.162
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.164
	Veicoli pesanti	1.595
	Veicoli totali	0.145
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.873
	Veicoli pesanti	0.671
	Veicoli totali	0.875
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.997
	Veicoli pesanti	0.675
	Veicoli totali	0.998

### B.1.10 Sensore MT14b – giovedì 21/05/2015 – 8:00-9:00

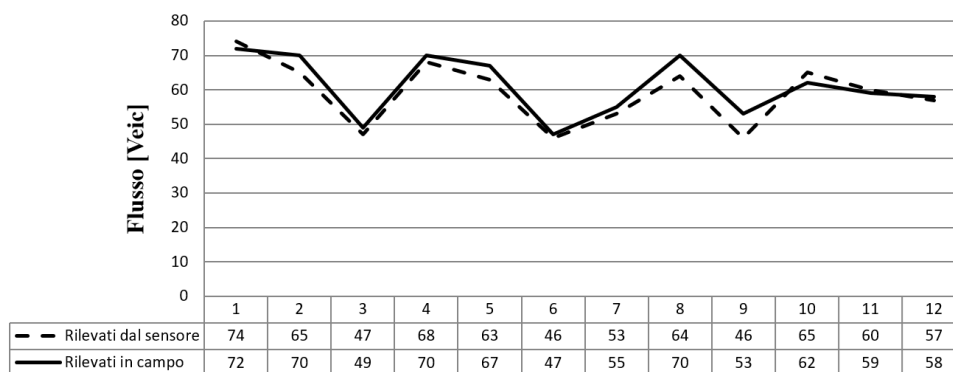


Figura B. 37 Andamento dei veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14b-21/05/2015,8:00-9:00

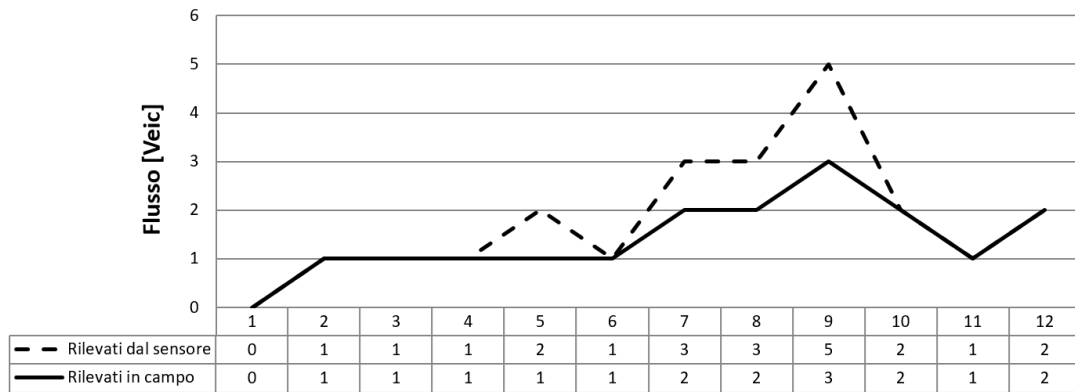


Figura B. 38 Andamento dei veicoli pesanti rilevati nei 5 min. MT14b-21/05/2015, 8:00-9:00

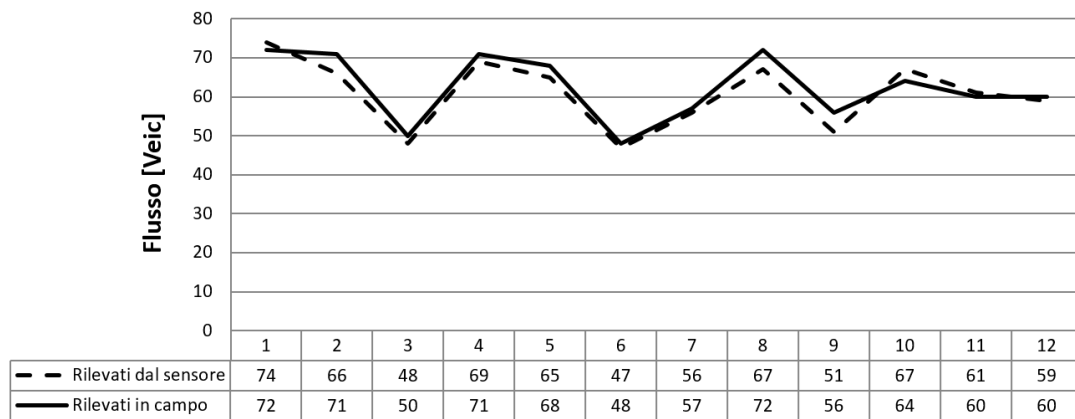


Figura B. 39 Andamento dei veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14b-21/05/2015, 8:00-9:00

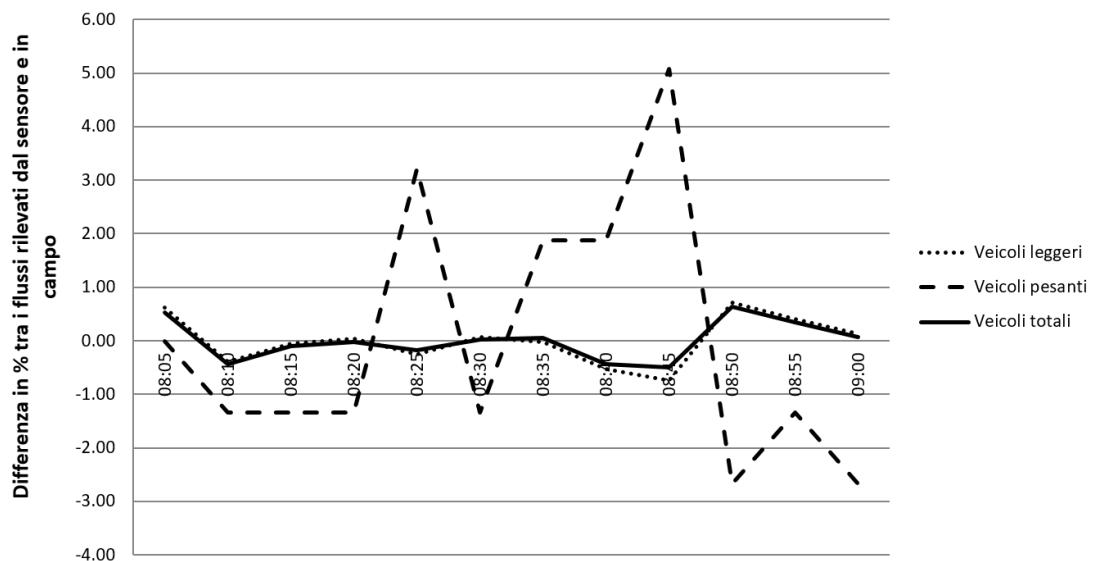


Figura B. 40 Analisi di affidabilità- MT14b-21/05/2015, 8:00-9:00

Tabella B. 10 Coefficienti – MT14b-21/05/2015, 8:00-9:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.157
	Veicoli pesanti	0.729
	Veicoli totali	0.144
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.144
	Veicoli pesanti	0.560
	Veicoli totali	0.137
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.864
	Veicoli pesanti	0.851
	Veicoli totali	0.873
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.998
	Veicoli pesanti	0.948
	Veicoli totali	0.998

### B.1.11 Sensore MT14b – giovedì 21/05/2015 – 13:00-14:00

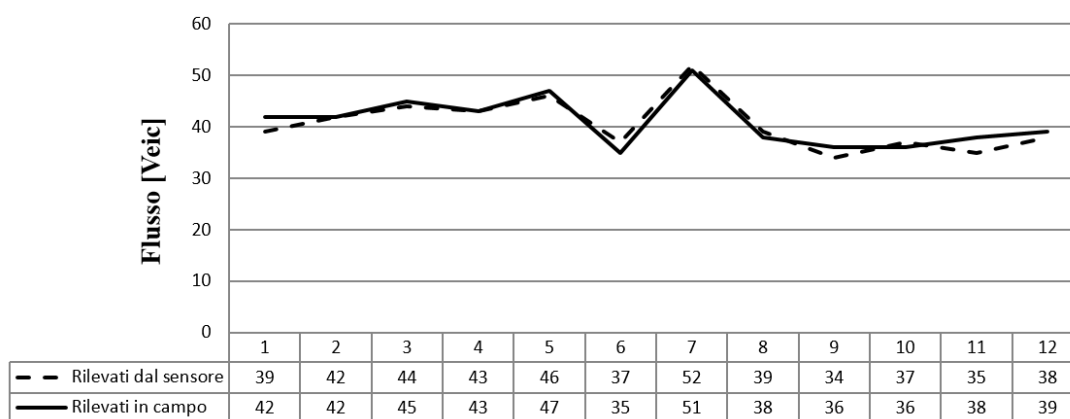


Figura B. 41 Andamento dei veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14b-21/05/2015,13:00-14:00

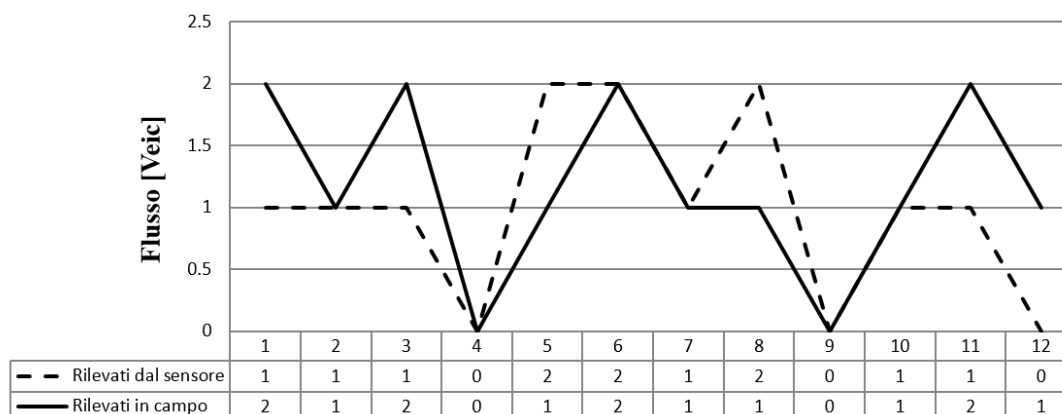


Figura B. 42 Andamento dei veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14b-21/05/2015, 13:00-14:00

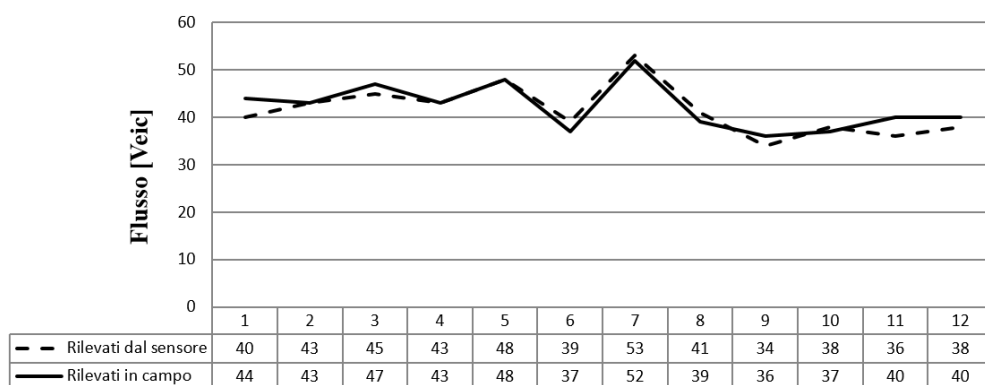


Figura B. 43 Andamento dei veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14b-21/05/2015, 13:00-14:00

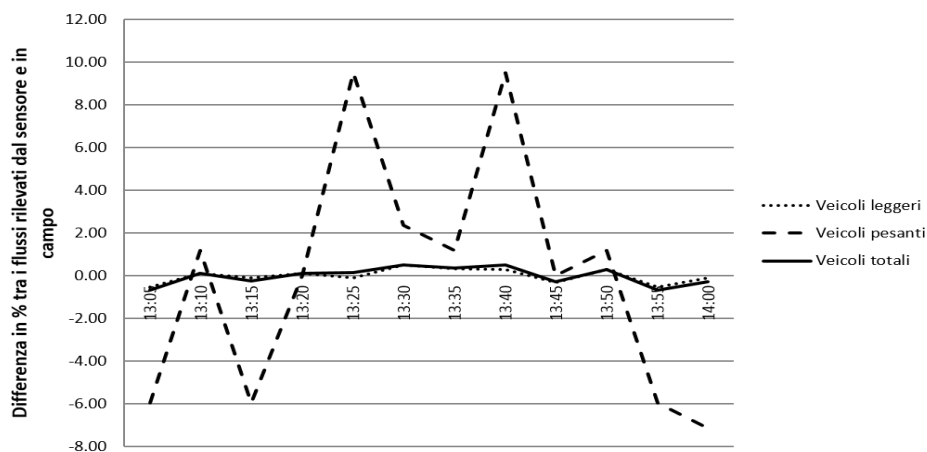


Figura B. 44 Analisi di affidabilità- MT14b-21/05/2015, 13:00-14:00

Tabella B. 11 Coefficienti – MT14b-21/05/2015, 13:00-14:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.127
	Veicoli pesanti	0.739
	Veicoli totali	0.128
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.120
	Veicoli pesanti	0.615
	Veicoli totali	0.117
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.870
	Veicoli pesanti	0.472
	Veicoli totali	0.842
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.999
	Veicoli pesanti	0.730
	Veicoli totali	0.998

### B.1.12 Sensore MT14b – giovedì 21/05/2015 – 19:00-20:00

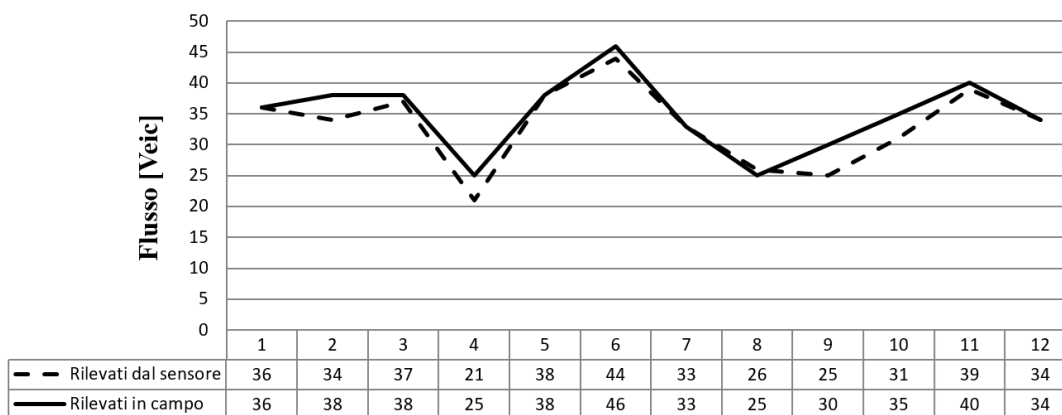


Figura B. 45 Andamento dei veicoli leggeri rilevati nei 5 min-MT14b-21/05/2015,19:00-20:00

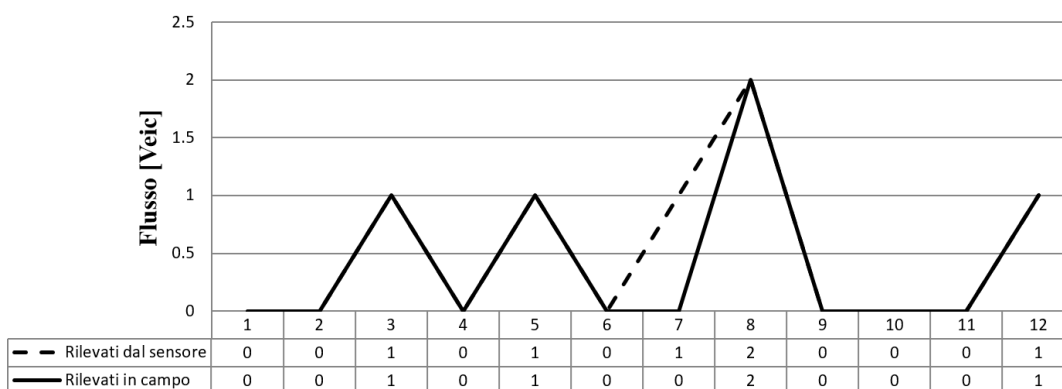


Figura B. 46 Andamento dei veicoli pesanti rilevati nei 5 min.MT14b-21/05/2015,19:00-20:00

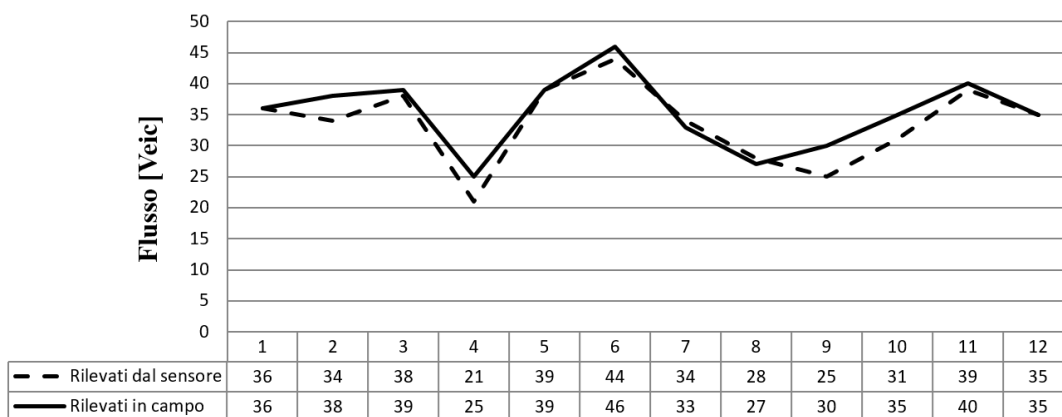


Figura B. 47 Andamento dei veicoli totali rilevati nei 5 min.- MT14b-21/05/2015, 19:00-20:00

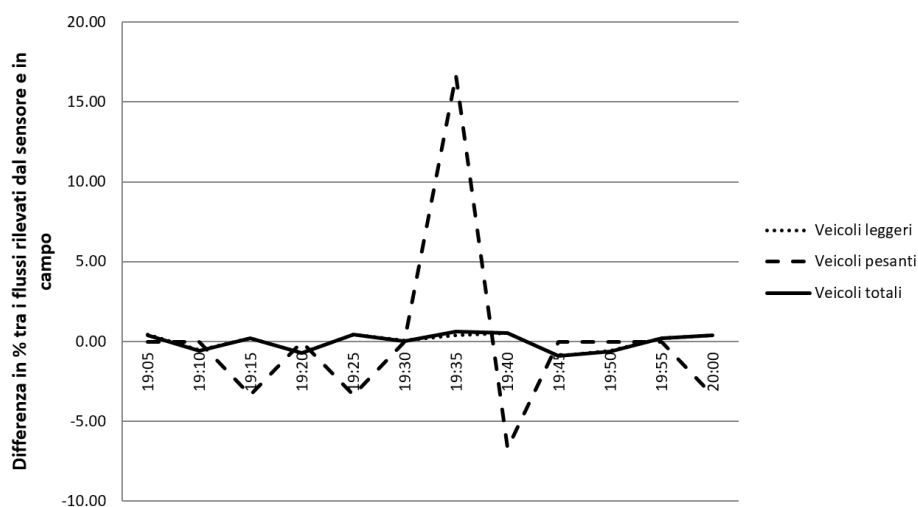


Figura B. 48 Analisi di affidabilità– MT14b-21/05/2015, 19:00-20:00

Tabella B. 12 Coefficienti – MT14b-21/05/2015, 19:00-20:00

<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_x</math></b>	Veicoli leggeri	0.197
	Veicoli pesanti	1.605
	Veicoli totali	0.193
<b>COEFF. DI VARIAZIONE <math>\sigma_y</math></b>	Veicoli leggeri	0.174
	Veicoli pesanti	1.605
	Veicoli totali	0.167
<b>COEFF. DI CORRELAZIONE</b>	Veicoli leggeri	0.870
	Veicoli pesanti	0.832
	Veicoli totali	0.866
<b>COEFF. DI DETERMINAZIONE <math>R^2</math></b>	Veicoli leggeri	0.996
	Veicoli pesanti	0.875
	Veicoli totali	0.996

## B.2 Analisi sezione MOD11 – arco 2

### B.2.1 Sensore MOD11, Arco 1 – giovedì 04/06/2015 – 8:00-9:00, 13:00-14:00, 19:00-20:00

Tabella B. 13 Flusso veicolare rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 04/06/2015, 8:00-9:00

Data	Ora	Veicoli STIMATI del quarto d'ora	Veicoli RILEVATI del quarto d'ora
04/06/2015	8:00-8:15	166.891	254
04/06/2015	8:15-8:30	209.565	241
04/06/2015	8:30-8:45	216.722	310
04/06/2015	8:45-9:00	219.657	310

Tabella B. 14 Flusso veicolare rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 04/06/2015, 13:00-14:00

Data	Ora	Veicoli STIMATI del quarto d'ora	Veicoli RILEVATI del quarto d'ora
04/06/2015	13:00-13:15	321.915	335
04/06/2015	13:15-13:30	315.015	465
04/06/2015	13:30-13:45	307.054	333
04/06/2015	13:45-14:00	300.143	393

Tabella B. 15 Flusso veicolare rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 04/06/2015, 19:00-20:00

Data	Ora	Veicoli STIMATI del quarto d'ora	Veicoli RILEVATI del quarto d'ora
04/06/2015	19:00-19:15	343.778	418
04/06/2015	19:15-19:30	331.788	406
04/06/2015	19:30-19:45	327.369	487
04/06/2015	19:45-20:00	337.180	355

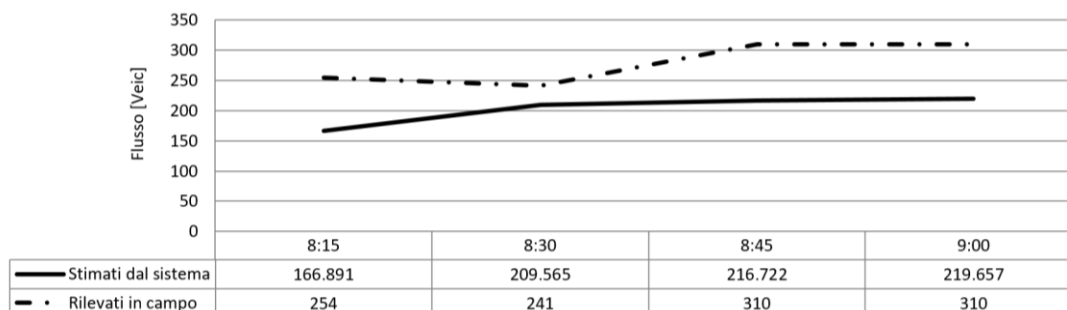


Figura B. 49 Andamento del flusso veicolare – MOD11, Arco 1 – 04/06/2015, 8:00-9:00



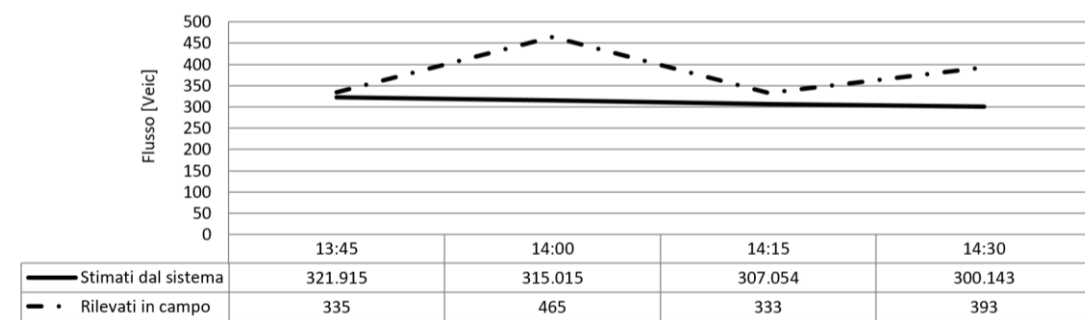


Figura B. 50 Andamento del flusso veicolare – MOD11, Arco 1 – 04/06/2015, 13:00-14:00

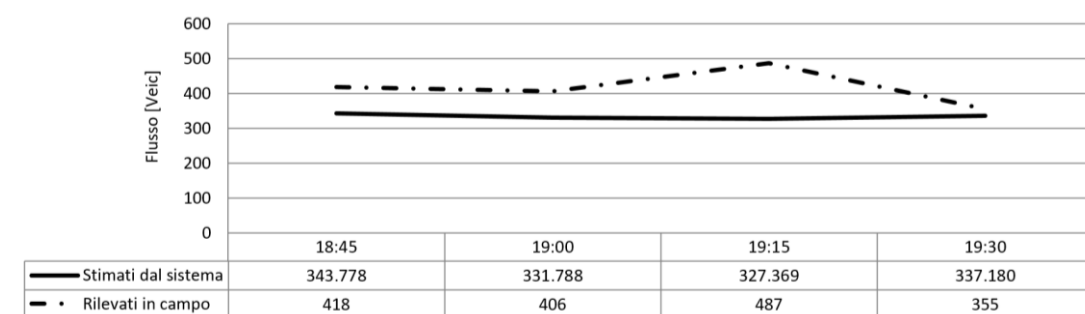


Figura B. 51 Andamento del flusso veicolare – MOD11, Arco 1 – 04/06/2015, 19:00-20:00

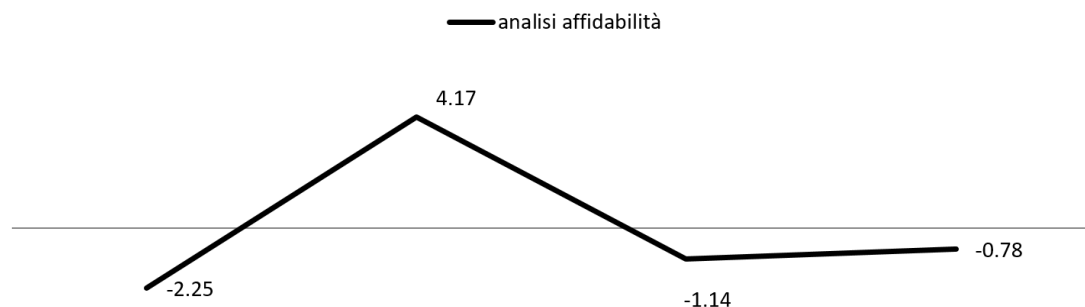


Figura B. 52 Analisi di affidabilità dei flussi – MOD11, Arco 1 – 04/06/2015, 8:00-9:00

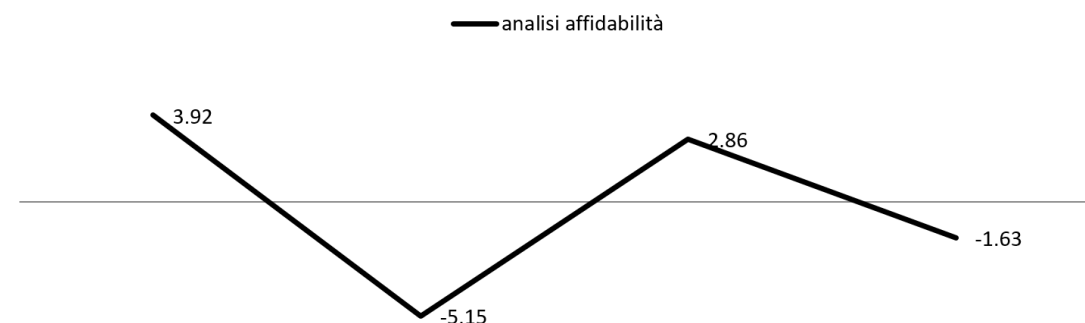


Figura B. 53 Analisi di affidabilità dei flussi – MOD11, Arco 1 – 04/06/2015, 13:00-14:00

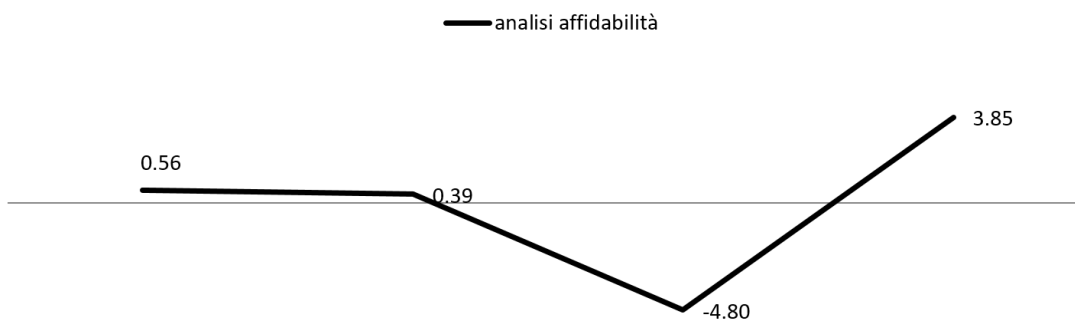


Figura B. 54 Analisi di affidabilità dei flussi – MOD11, Arco 1 – 04/06/2015, 19:00-20:00

Tabella B. 16 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 04/06/2015, 8:00-9:00

Coefficienti	Valori
Coeff. di variazione $\sigma_x$	0.121
Coeff. di variazione $\sigma_y$	0.131
Coeff. di correlazione	0.593

Tabella B. 17 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 04/06/2015, 13:00-14:00

Coefficienti	Valori
Coeff. di variazione $\sigma_x$	0.030
Coeff. di variazione $\sigma_y$	0.163
Coeff. di correlazione	0.598

Tabella B. 18 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 04/06/2015, 19:00-20:00

Coefficienti	Valori
Coeff. di variazione $\sigma_x$	0.021
Coeff. di variazione $\sigma_y$	0.131
Coeff. di correlazione	0.541

## B.2.2 Sensore MOD11, Arco 1 – lunedì 08/06/2015 – 8:00-9:00, 13:00-14:00, 19:00-20:00

Tabella B. 19 Flusso veicolare rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 8:00-9:00

Data	Ora	Veicoli STIMATI del quarto d'ora	Veicoli RILEVATI del quarto d'ora
08/06/2015	8:00-8:15	144.188	239
08/06/2015	8:15-8:30	153.245	224
08/06/2015	8:30-8:45	158.216	339
08/06/2015	8:45-9:00	296.525	370

Tabella B. 20 Flusso veicolare rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 13:00-14:00

Data	Ora	Veicoli STIMATI del quarto d'ora	Veicoli RILEVATI del quarto d'ora
08/06/2015	13:00-13:15	334.116	409
08/06/2015	13:15-13:30	329.691	340
08/06/2015	13:30-13:45	329.036	360
08/06/2015	13:45-14:00	326.638	392

Tabella B. 21 Flusso veicolare rilevato e stimato – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 19:00-20:00

Data	Ora	Veicoli STIMATI del quarto d'ora	Veicoli RILEVATI del quarto d'ora
08/06/2015	19:00-19:15	342.999	418
08/06/2015	19:15-19:30	341.447	465
08/06/2015	19:30-19:45	340.376	423
08/06/2015	19:45-20:00	339.857	406

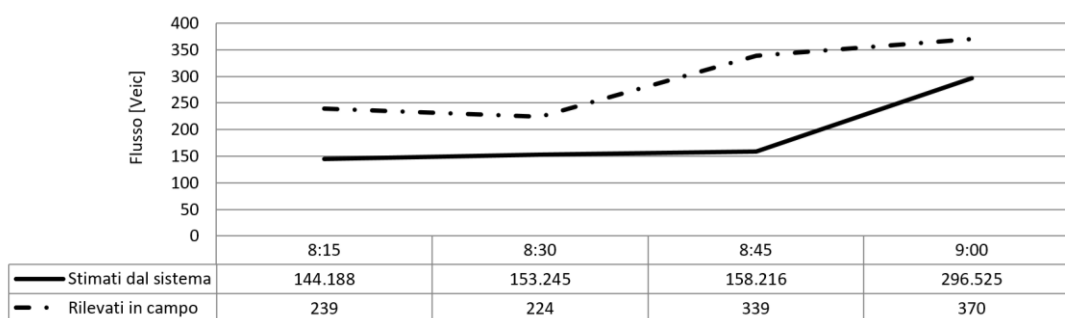


Figura B. 55 Andamento del flusso veicolare – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 8:00-9:00

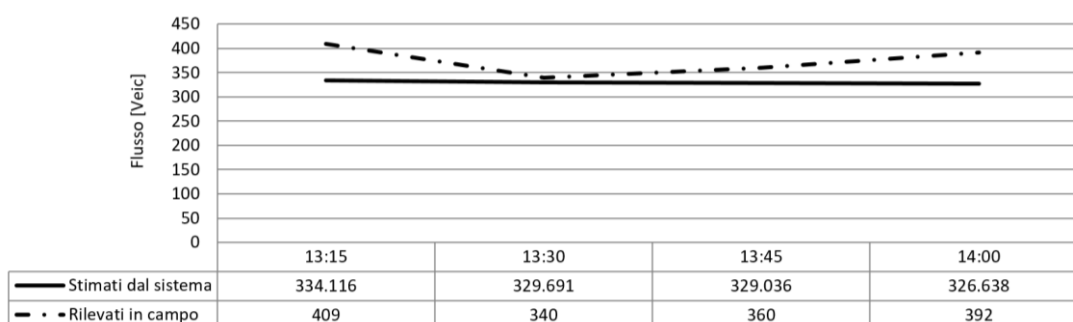


Figura B. 56 Andamento del flusso veicolare – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 13:00-14:00

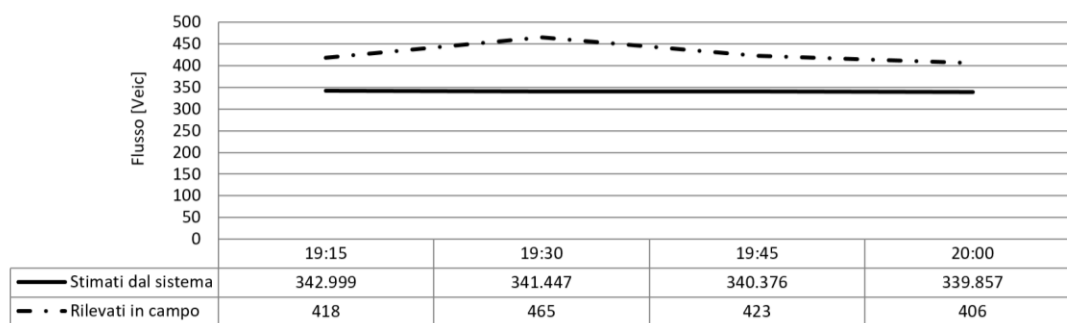


Figura B. 57 Andamento del flusso veicolare – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 19:00-20:00

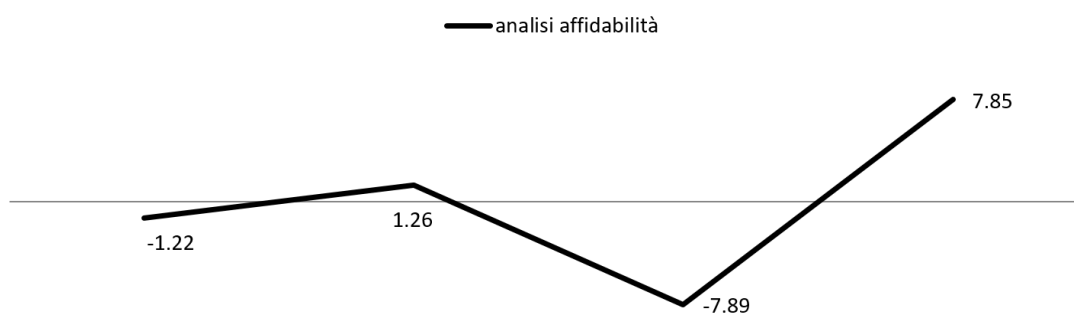


Figura B. 58 Analisi di affidabilità dei flussi – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 8:00-9:00

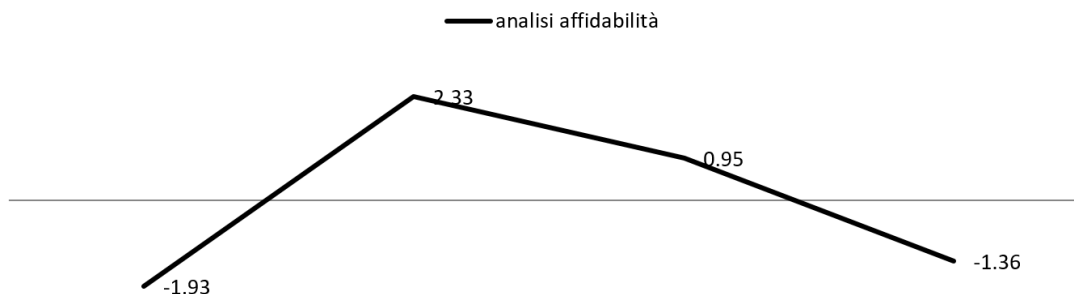


Figura B. 59 Analisi di affidabilità dei flussi – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 13:00-14:00

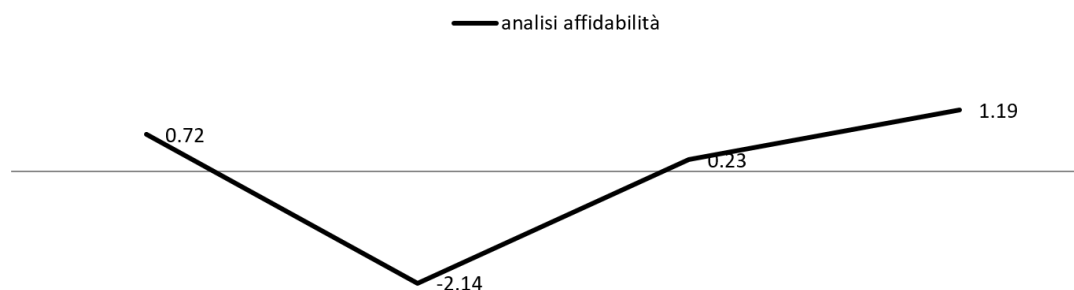


Figura B. 60 Analisi di affidabilità dei flussi – MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 19:00-20:00

Tabella B. 22 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 8:00-9:00

<b>Coefficienti</b>	<b>Valori</b>
Coeff. di variazione $\sigma_x$	0.386
Coeff. di variazione $\sigma_y$	0.005
Coeff. di correlazione	0.745

Tabella B. 23 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 13:00-14:00

<b>Coefficienti</b>	<b>Valori</b>
Coeff. di variazione $\sigma_x$	0.009
Coeff. di variazione $\sigma_y$	0.011
Coeff. di correlazione	0.572

Tabella B. 24 Coefficienti MOD11, Arco 1 – 08/06/2015, 19:00-20:00

<b>Coefficienti</b>	<b>Valori</b>
Coeff. di variazione $\sigma_x$	0.004
Coeff. di variazione $\sigma_y$	0.060
Coeff. di correlazione	0.531

# Appendice C

## RISULTATI DELLA DETERMINAZIONE DELL’AFFIDABILITÀ DEI TEMPI DI VIAGGIO

### C.1 Analisi intra-giornaliera – 18/06/2016

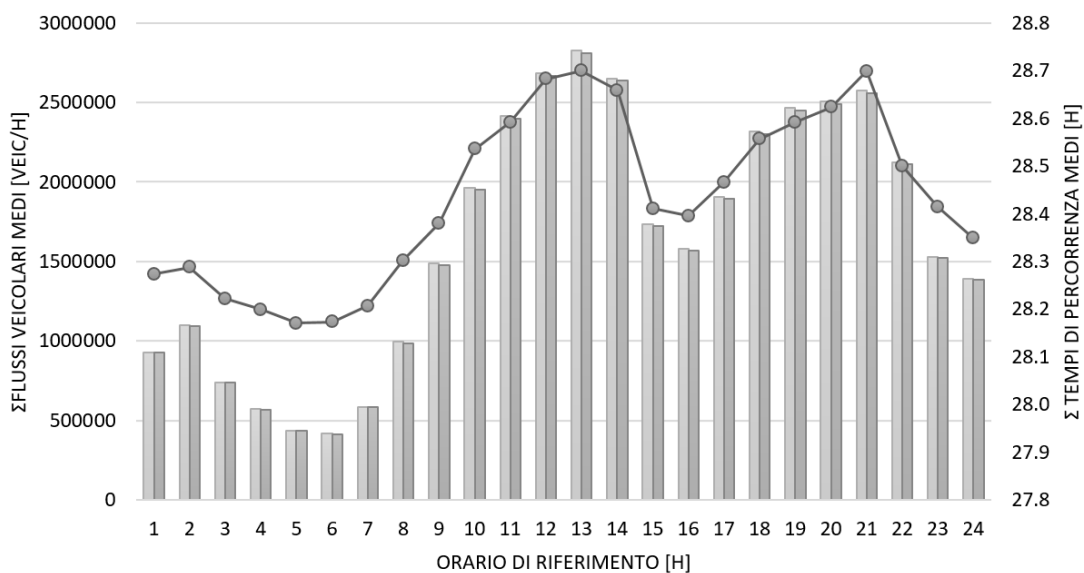


Figura C. 1 Analisi globale di rete - 18/06/2016

Tabella C. 1 Tempi e flussi medi orari di rete – 18/06/2016

Orario di riferimento	$\Sigma$ Tempi medi di percorrenza [h]	$\Sigma$ Flussi entranti medi [veic/h]	$\Sigma$ Flussi uscenti medi [veic/h]
00:00-01:00	28.274	930972.377	925479.699
01:00-02:00	28.288	1098514.107	1094029.671
02:00-03:00	28.223	741167.183	738999.701
03:00-04:00	28.199	573098.639	570609.693
04:00-05:00	28.171	436224.985	435342.547
05:00-06:00	28.174	417414.769	415249.636
06:00-07:00	28.207	586994.837	583145.725
07:00-08:00	28.302	995084.065	987657.968
08:00-09:00	28.380	1486203.007	1475576.514
09:00-10:00	28.536	1965991.221	1952345.861
10:00-11:00	28.592	2414631.234	2398100.835
11:00-12:00	28.682	2681894.940	2663894.828
12:00-13:00	28.700	2828547.325	2810003.847
13:00-14:00	28.658	2649763.454	2635801.271
14:00-15:00	28.411	1732390.128	1724414.225
15:00-16:00	28.395	1578903.968	1567864.989
16:00-17:00	28.466	1905686.773	1891994.392
17:00-18:00	28.557	2317461.393	2300666.113
18:00-19:00	28.592	2467211.010	2451021.501
19:00-20:00	28.623	2508173.762	2491747.047
20:00-21:00	28.699	2572714.234	2556511.154
21:00-22:00	28.501	2121322.793	2111031.178
22:00-23:00	28.414	1529976.500	1522295.973
23:00-24:00	28.349	1391884.867	1384497.588

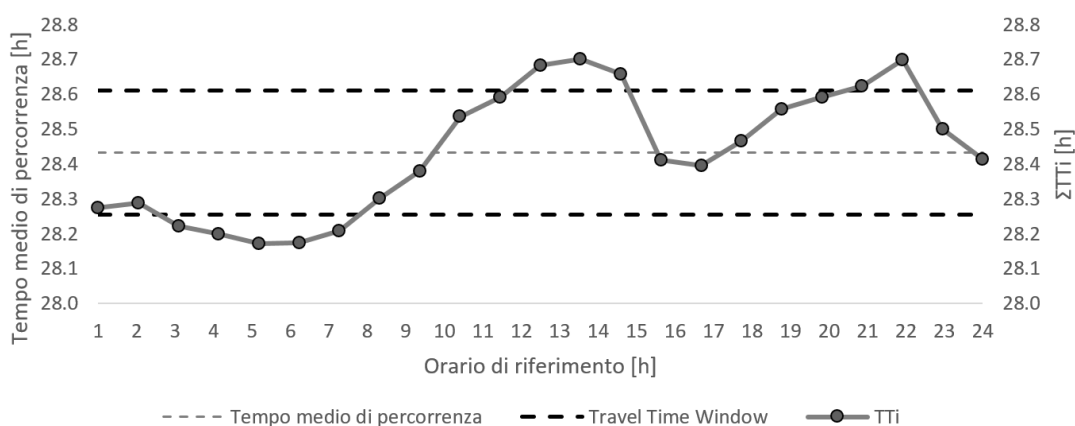


Figura C. 2 Travel Time Window dei tempi di percorrenza medi orari di rete – 18/06/2016

## C.2 Analisi intra-giornaliera – 19/06/2016

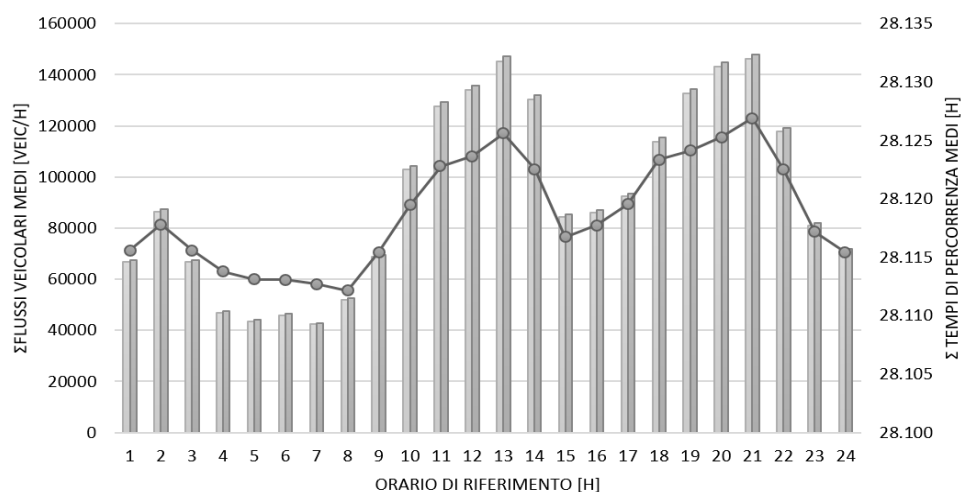


Figura C. 3 Analisi globale di rete - 19/06/2016

Tabella C. 2 Tempi e flussi medi orari di rete – 19/06/2016

Orario di riferimento	$\Sigma$ Tempi medi di percorrenza [h]	$\Sigma$ Flussi entranti medi [veic/h]	$\Sigma$ Flussi uscenti medi [veic/h]
00:00-01:00	28.116	66734.154	67534.638
01:00-02:00	28.118	86295.133	87359.266
02:00-03:00	28.116	66734.154	67534.638
03:00-04:00	28.114	46919.630	47519.489
04:00-05:00	28.113	43600.473	44120.081
05:00-06:00	28.113	45899.595	46418.724
06:00-07:00	28.113	42373.726	42868.981
07:00-08:00	28.112	52065.356	52670.086
08:00-09:00	28.115	68719.842	69525.027
09:00-10:00	28.119	103020.718	104281.938
10:00-11:00	28.123	127723.541	129367.330
11:00-12:00	28.124	133963.758	135681.107
12:00-13:00	28.126	145382.661	147181.753
13:00-14:00	28.123	130392.017	131994.729
14:00-15:00	28.117	84322.272	85341.564
15:00-16:00	28.118	86021.229	87082.771
16:00-17:00	28.120	92450.723	93585.391
17:00-18:00	28.123	113964.018	115345.198
18:00-19:00	28.124	132706.256	134345.237
19:00-20:00	28.125	143268.643	144996.323
20:00-21:00	28.127	146229.407	147966.561
21:00-22:00	28.123	117877.928	119267.732
22:00-23:00	28.117	81030.165	82028.457
23:00-24:00	28.115	71035.353	71947.132



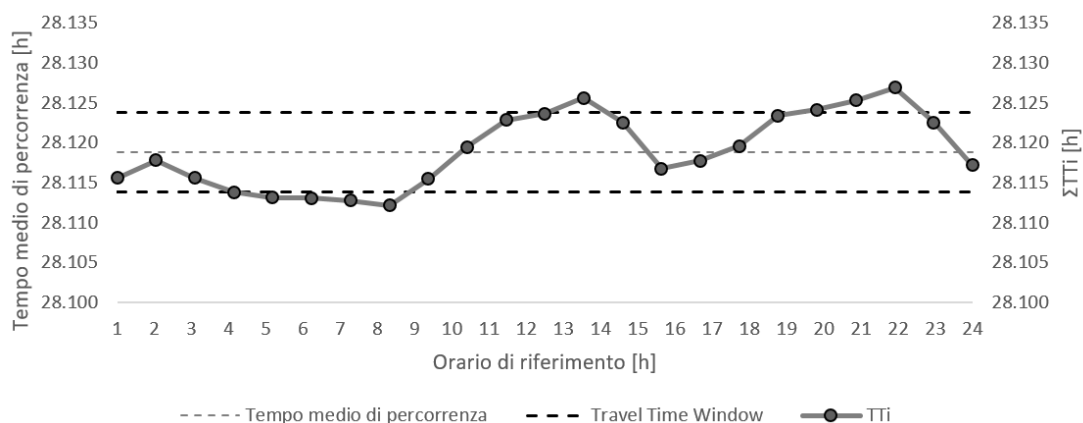


Figura C. 4 Travel Time Window dei tempi di percorrenza medi orari di rete – 19/06/2016

### C.3 Analisi intra-giornaliera – 20/06/2016

Tabella C. 3 Tempi e flussi medi orari di rete – 20/06/2016

Orario di riferimento	$\Sigma$ Tempi medi di percorrenza [h]	$\Sigma$ Flussi entranti medi [veic/h]	$\Sigma$ Flussi uscenti medi [veic/h]
00:00-01:00	28.177	389521.635	386077.020
01:00-02:00	28.179	484771.869	483463.145
02:00-03:00	28.151	308270.084	307750.422
03:00-04:00	28.139	226558.949	225948.212
04:00-05:00	28.140	228865.787	227865.746
05:00-06:00	28.172	388108.898	385225.337
06:00-07:00	28.257	813032.630	805427.840
07:00-08:00	28.497	1974243.290	1956713.194
08:00-09:00	28.657	2567256.393	2548920.822
09:00-10:00	28.638	2457851.866	2442118.455
10:00-11:00	28.582	2363666.203	2347897.613
11:00-12:00	28.570	2345352.640	2328864.760
12:00-13:00	28.563	2380692.778	2363576.142
13:00-14:00	28.601	2551309.761	2533357.017
14:00-15:00	28.649	2320482.732	2305215.064
15:00-16:00	28.609	2245273.360	2228475.754
16:00-17:00	28.596	2459513.155	2441246.568
17:00-18:00	28.620	2639717.909	2621518.877
18:00-19:00	28.658	2634483.624	2615993.978
19:00-20:00	28.609	2577836.167	2560168.193
20:00-21:00	28.629	2451075.808	2436500.295
21:00-22:00	28.386	1653160.598	1646029.363
22:00-23:00	28.284	1068629.346	1063588.263
23:00-24:00	28.251	876848.446	872403.976

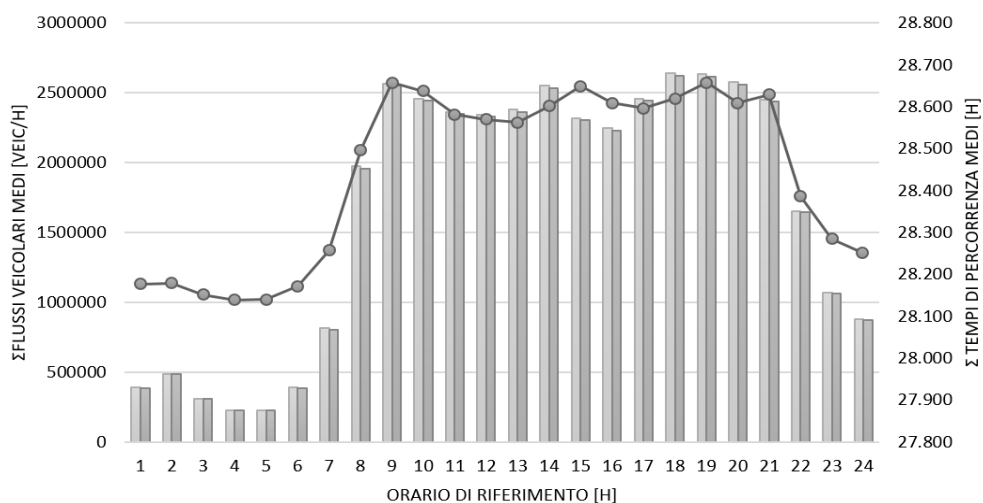


Figura C. 5 Analisi globale di rete - 20/06/2016

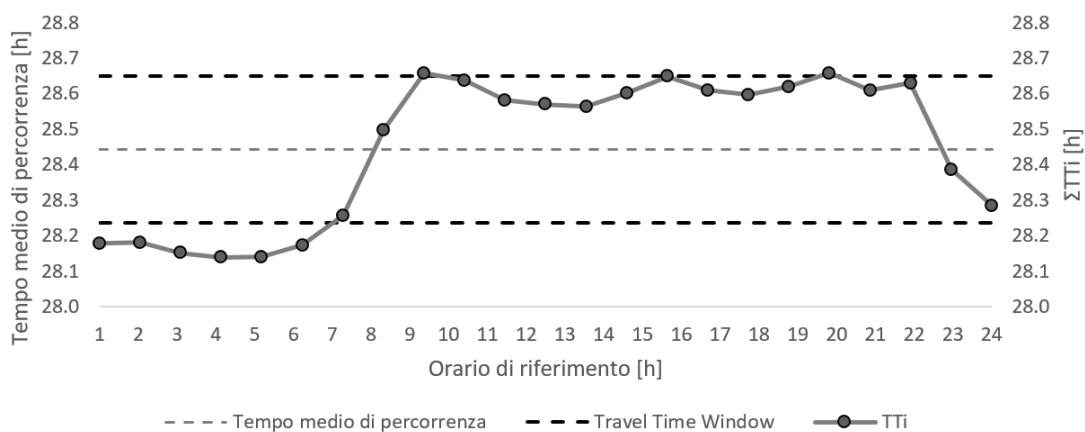


Figura C. 6 Travel Time Window dei tempi di percorrenza medi orari di rete – 20/06/2016

### C.4 Analisi intra-giornaliera – 23/06/2016

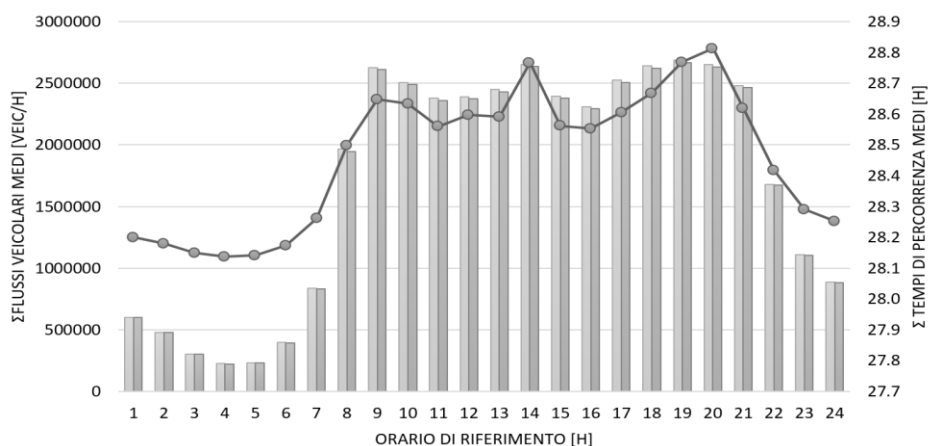


Figura C. 7 Analisi globale di rete - 23/06/2016

Tabella C. 4 Tempi e flussi medi orari di rete – 23/06/2016

Orario di riferimento	$\Sigma$ Tempi medi di percorrenza [h]	$\Sigma$ Flussi entranti medi [veic/h]	$\Sigma$ Flussi uscenti medi [veic/h]
00:00-01:00	28.200	600365.838	599392.417
01:00-02:00	28.179	481420.858	480001.995
02:00-03:00	28.150	302785.185	302109.004
03:00-04:00	28.139	224760.822	224079.829
04:00-05:00	28.141	233178.906	232216.351
05:00-06:00	28.173	397466.909	394644.677
06:00-07:00	28.262	837894.961	830462.849
07:00-08:00	28.499	1964522.871	1946833.156
08:00-09:00	28.648	2628530.861	2610674.847
09:00-10:00	28.634	2505225.816	2489862.061
10:00-11:00	28.560	2377500.592	2361859.430
11:00-12:00	28.597	2388688.953	2372440.798
12:00-13:00	28.591	2448325.437	2431715.381
13:00-14:00	28.767	2654146.315	2637135.809
14:00-15:00	28.562	2392830.429	2378281.885
15:00-16:00	28.553	2309056.009	2292772.027
16:00-17:00	28.606	2526010.006	2508279.596
17:00-18:00	28.669	2640719.391	2622359.696
18:00-19:00	28.769	2686151.625	2668133.174
19:00-20:00	28.814	2651088.428	2634294.609
20:00-21:00	28.619	2478270.265	2464033.175
21:00-22:00	28.418	1681447.704	1674518.457
22:00-23:00	28.291	1107109.014	1102469.907
23:00-24:00	28.252	887079.995	882762.615

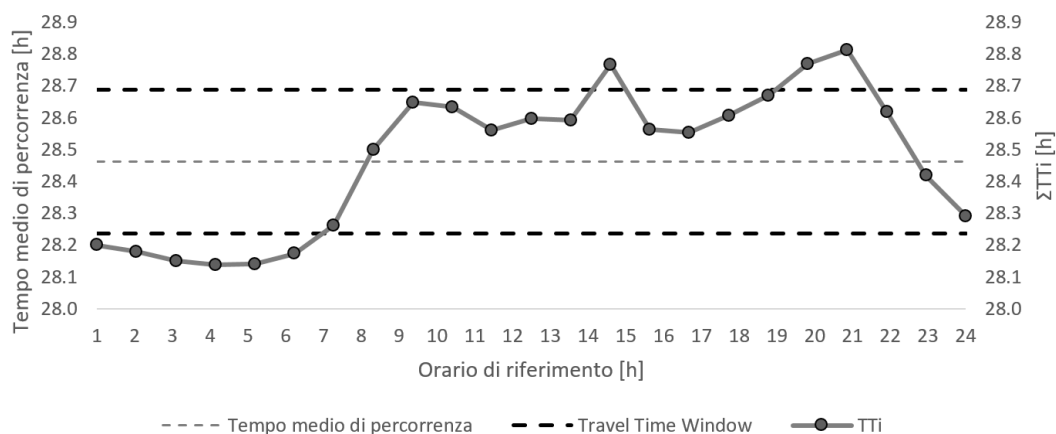


Figura C. 8 Travel Time Window dei tempi di percorrenza medi orari di rete – 23/06/2016

## C.5 Analisi intra-giornaliera – 25/06/2016

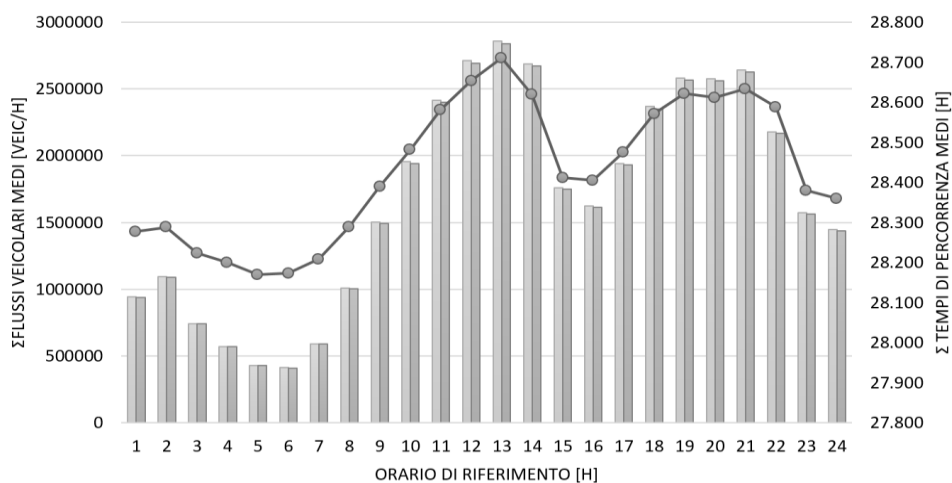


Figura C. 9 Analisi globale di rete - 25/06/2016

Tabella C. 5 Tempi e flussi medi orari di rete – 25/06/2016

Orario di riferimento	Σ Tempi medi di percorrenza [h]	Σ Flussi entranti medi [veic/h]	Σ Flussi uscenti medi [veic/h]
00:00-01:00	28.277	941119.013	935763.110
01:00-02:00	28.288	1092776.510	1088192.844
02:00-03:00	28.223	741029.584	738827.839
03:00-04:00	28.200	570288.954	567691.252
04:00-05:00	28.170	429430.765	428434.872
05:00-06:00	28.173	412808.157	410552.753
06:00-07:00	28.209	592034.980	588226.907
07:00-08:00	28.290	1009340.790	1001948.611
08:00-09:00	28.390	1502828.726	1492360.960
09:00-10:00	28.482	1956415.947	1942606.400
10:00-11:00	28.582	2416430.193	2399787.044
11:00-12:00	28.654	2711802.414	2693910.630
12:00-13:00	28.710	2857998.815	2839638.629
13:00-14:00	28.619	2686170.702	2672407.869
14:00-15:00	28.412	1759537.640	1751711.453
15:00-16:00	28.405	1623317.787	1612599.558
16:00-17:00	28.476	1943462.333	1930090.479
17:00-18:00	28.571	2367577.354	2351189.525
18:00-19:00	28.622	2579212.922	2564403.916
19:00-20:00	28.612	2578162.547	2562603.259
20:00-21:00	28.633	2640245.052	2625060.226
21:00-22:00	28.589	2178536.552	2168996.679
22:00-23:00	28.380	1572294.662	1565056.743
23:00-24:00	28.359	1444788.059	1437986.755

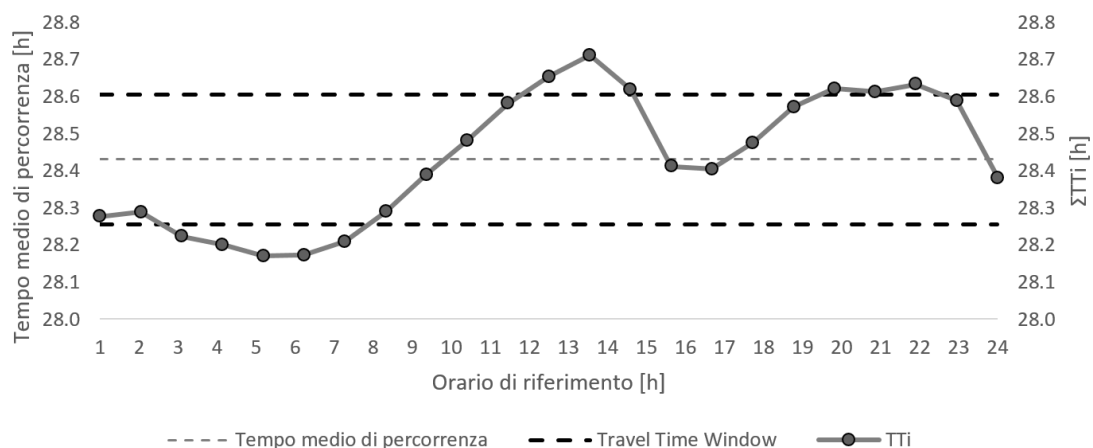


Figura C. 10 Travel Time Window dei tempi di percorrenza medi orari di rete – 25/06/2016

## C.6 Analisi intra-giornaliera – 26/06/2016

Tabella C. 6 Tempi e flussi medi orari di rete – 26/06/2016

Orario di riferimento	$\sum$ Tempi medi di percorrenza [h]	$\sum$ Flussi entranti medi [veic/h]	$\sum$ Flussi uscenti medi [veic/h]
00:00-01:00	28.115	68513.588	69396.694
01:00-02:00	28.119	98167.319	99358.981
02:00-03:00	28.115	68513.588	69396.694
03:00-04:00	28.113	52924.969	53554.441
04:00-05:00	28.113	43553.581	44090.547
05:00-06:00	28.113	40716.690	41189.956
06:00-07:00	28.113	43748.472	44272.217
07:00-08:00	28.114	52488.308	53122.297
08:00-09:00	28.116	75373.832	76247.966
09:00-10:00	28.119	102854.201	104144.334
10:00-11:00	28.122	119216.862	120823.375
11:00-12:00	28.123	124047.091	125651.059
12:00-13:00	28.123	126832.680	128445.917
13:00-14:00	28.122	116439.355	117898.842
14:00-15:00	28.116	77589.994	78552.745
15:00-16:00	28.116	78572.100	79542.279
16:00-17:00	28.118	82572.149	83683.354
17:00-18:00	28.119	89059.438	90297.994
18:00-19:00	28.121	106115.037	107498.376
19:00-20:00	28.123	124770.557	126405.763
20:00-21:00	28.125	135743.942	137533.003
21:00-22:00	28.123	119134.216	120733.389
22:00-23:00	28.119	87606.001	88732.998
23:00-24:00	28.115	74018.886	74992.109

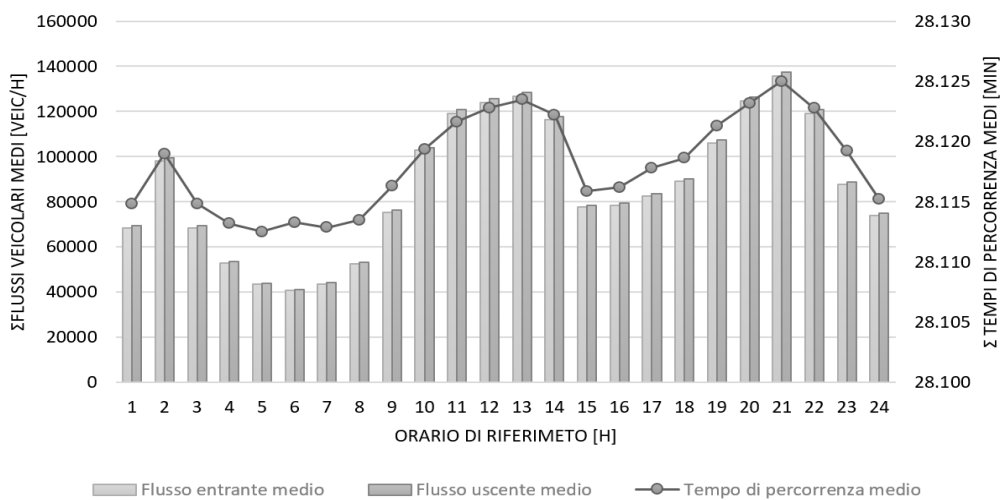


Figura C. 11 Analisi globale di rete - 26/06/2016

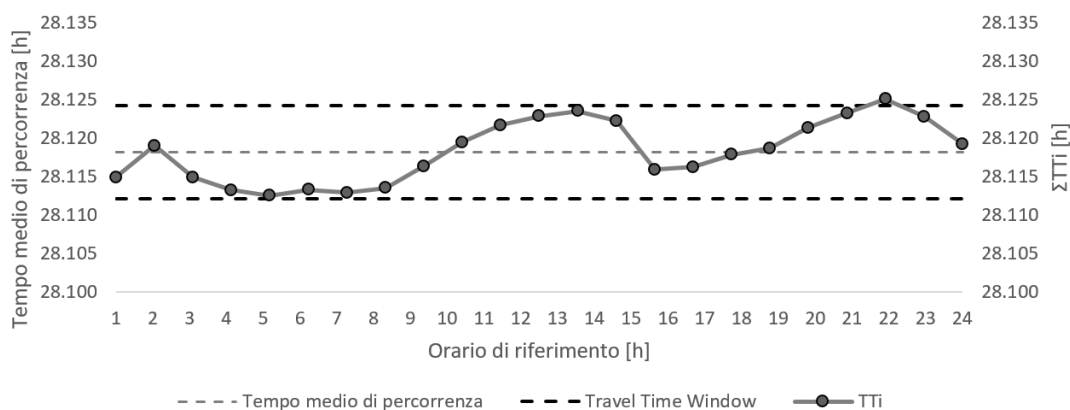


Figura C. 12 Travel Time Window dei tempi di percorrenza medi orari di rete – 26/06/2016

## C.7 Analisi intra-giornaliera – 27/06/2016

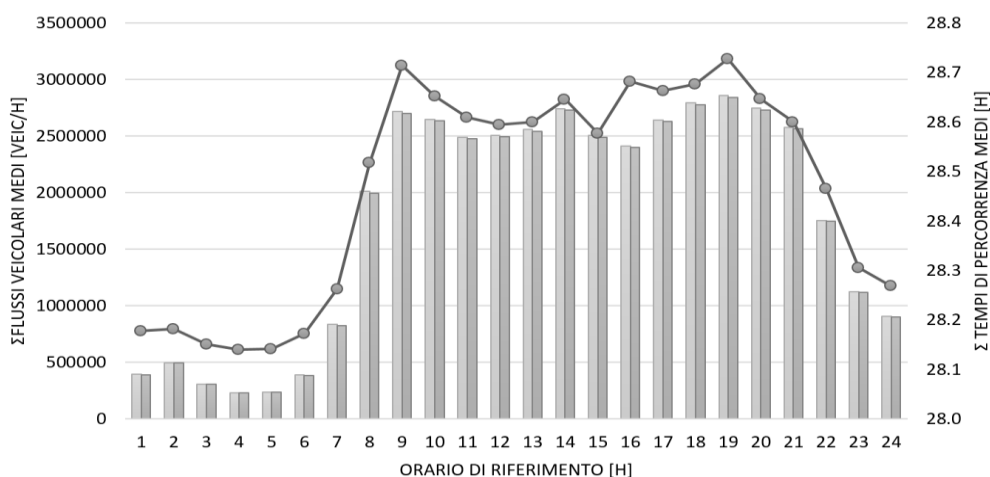


Figura C. 13 Analisi globale di rete - 27/06/2016

Tabella C. 7 Tempi e flussi medi orari di rete – 27/06/2016

Orario di riferimento	$\Sigma$ Tempi medi di percorrenza [h]	$\Sigma$ Flussi entranti medi [veic/h]	$\Sigma$ Flussi uscenti medi [veic/h]
00:00-01:00	28.178	392290.270	388880.464
01:00-02:00	28.181	496006.379	494793.898
02:00-03:00	28.151	306644.329	306055.021
03:00-04:00	28.140	229517.569	228917.704
04:00-05:00	28.142	233577.428	232619.591
05:00-06:00	28.172	387635.501	384724.647
06:00-07:00	28.262	833935.713	826477.892
07:00-08:00	28.517	2012877.221	1995623.625
08:00-09:00	28.713	2718252.297	2701228.794
09:00-10:00	28.652	2646686.069	2632709.560
10:00-11:00	28.609	2490135.200	2475549.235
11:00-12:00	28.594	2506988.652	2492023.972
12:00-13:00	28.600	2557574.710	2542187.812
13:00-14:00	28.645	2743158.189	2727015.828
14:00-15:00	28.577	2503323.020	2489838.169
15:00-16:00	28.682	2413726.959	2398473.421
16:00-17:00	28.662	2644081.553	2627506.702
17:00-18:00	28.676	2792135.386	2775315.119
18:00-19:00	28.727	2857507.854	2841276.231
19:00-20:00	28.646	2746805.918	2730938.224
20:00-21:00	28.600	2576539.150	2563422.720
21:00-22:00	28.465	1752288.805	1746346.086
22:00-23:00	28.305	1123777.000	1119442.793
23:00-24:00	28.268	904987.233	900914.743

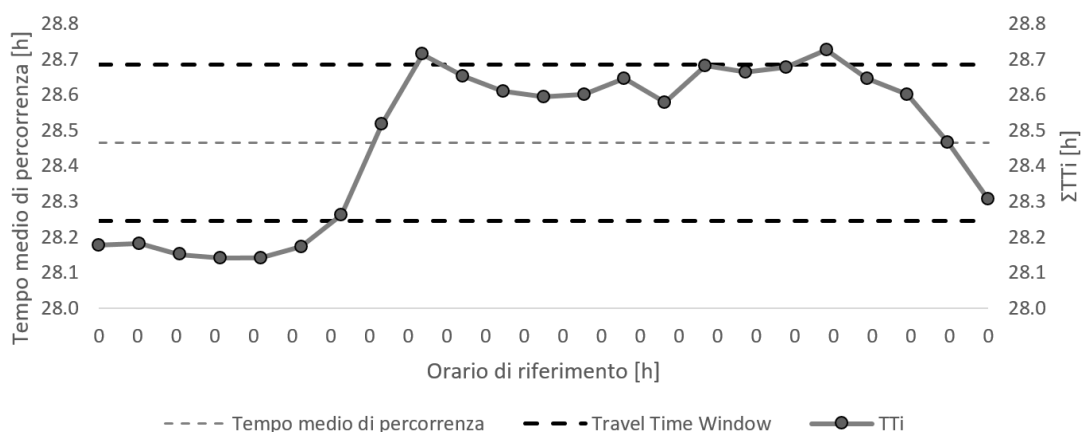


Figura C. 14 Travel Time Window dei tempi di percorrenza medi orari di rete – 27/06/2016