

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale  
In Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Simulazione e controllo semaforico di intersezioni stradali in ambito urbano**



**Relatore**

Prof. Francesco Paolo Deflorio

**Relatori esterni**

Urban & Interurban DC Manager Gianni Canepari

UT Ing. Giovanni Paglino

**Candidato**

Luca Stragiotti

A. A. 2020-2021



## **Ringraziamenti**

Desidero ringraziare prima di tutto il mio relatore, il professor Deflorio, uno dei professori che ha condizionato la mia attuale scelta lavorativa. Lo ringrazio per la disponibilità dimostratami nello svolgere questo ultimo grande passo in questo magnifico percorso. Un percorso che è stato ricco di successi, ma caratterizzato da alcune difficoltà, senza le quali non sarei maturato per diventare la persona che ora sono. Ringrazio i colleghi di Swarco Mizar, che mi hanno guidato e stanno continuando a farlo in queste settimane. In particolare ringrazio Alessandro Murro, amministratore delegato di Swarco Mizar, e il responsabile del team di UT engineering, Giovanni Canepari, per avermi coinvolto nel progetto e avermi inserito nel team di Swarco. Ringrazio Giovanni Paglino, il nostro collega di Roma, che con la sua conoscenza e pazienza mi ha accompagnato in questo percorso, subendo incessanti domande e confronti.

Ringrazio i compagni di corso, con cui ho condiviso la vita in questi anni universitari: Andrea, Lorenzo, Sandro e Jean Pierre, ed i miei amici di sempre, Andrea, Nicolò, Gabriele, Riccardo e Davide, che hanno condiviso con me esperienze e momenti indimenticabili.

Ringrazio la mia famiglia, che mi ha insegnato i valori di sacrificio e dedizione, ma anche l'umiltà e il valore del legame familiare. Ringrazio mio fratello Matteo, mio padre Valter e mia mamma Pier Carla, che si sono subito tutti i miei momenti di ansia e preoccupazione, distraendomi e supportandomi con il loro affetto, e che mi hanno permesso di studiare e completare la mia formazione presso questa grande istituzione quale è il Politecnico di Torino. Ringrazio i miei nonni, in particolare mio nonno Gian Pietro, colui che fin da piccolo con i suoi famosi "discorsi" ci ha aiutati a crescere nel migliore dei modi. Ringrazio la donna che mi ha reso l'uomo che sono, stando al mio fianco, motivandomi e sopportandomi: grazie Chiara per questi anni ed in particolare per gli ultimi mesi di questo percorso. Per un ultimo ringraziamento vorrei citare colui che è stato mentore e nonno acquisito, nonché colui che ha reso possibile il raggiungimento di questo obiettivo: Giacinto. Non dimenticherò mai la persona che eri e l'aiuto che mi hai dato, spero che da lassù tu sia fiero, e che continuerai a vegliare su di me per il resto della vita.

## Sommario

1	Scopo della tesi.....	14
2	Introduzione.....	15
3	Sistemi di controllo del traffico .....	17
3.1	Concetti Base sulla circolazione stradale .....	17
3.2	Variabili del traffico .....	18
3.3	Parametri dei controllori.....	20
3.4	Sistemi di controllo del traffico.....	21
3.4.1	Proprietà dei sistemi di controllo .....	22
3.4.2	Obiettivi dell'ottimizzazione.....	24
3.5	Sistemi di controllo e gestione del traffico.....	25
3.5.1	Modalità tradizionali .....	25
3.5.2	Modalità traffic-responsive .....	27
4	Caso studio: incrocio di Porta Maggiore .....	41
4.1.2	Domanda di mobilità.....	55
4.1.3	Affinamento del modello .....	62
4.2	Simulazioni in ambiente Vissim: picco mattutino .....	70
4.2.1	Parametri di simulazione costanti .....	70
4.2.2	Parametri di simulazione variabili .....	71
5	Scenari di traffico simulati.....	72
5.1.1	Scenario 1 – Stato di Fatto .....	72
5.1.2	Scenario 2 – Coordinazione tra Gruppi Segnale.....	77
6	Analisi dei risultati.....	98
6.1	Via dello Scalo San Lorenzo .....	98
6.2	Via Casilina .....	102
6.3	Via Prenestina.....	105
6.4	Via Eleniana .....	107

6.5	Via di Porta Maggiore .....	109
6.6	Osservazioni al nodo .....	111
6.6.1	Consumi .....	112
6.6.2	Impatto sui tempi di attesa degli attraversamenti pedonali.....	115
6.7	Stime del livello di servizio (Los) .....	119
7	Conclusioni.....	124
8	Bibliografia.....	127
9	APPENDICE A: metodologie per il rilevamento dei dati.....	129
9.1	Metodi tradizionali .....	129
9.1.1	Spire induttive.....	129
9.2	Metodi innovativi .....	131
9.2.1	Sensori Bluetooth.....	131
9.2.2	Videocamere .....	132
9.2.3	Tracciamento satellitare \ eventi da dispositivi mobili .....	134
9.2.4	veicoli sonda .....	136
9.2.5	Informazioni dai Social Network.....	137
10	APPENDICE B.....	138
10.1	Calcolo degli offset e della percentuale di coordinazione.....	138
10.2	Tempi di viaggio Scenario 1 .....	140
10.3	Tempi di viaggio Scenario 2.1 .....	141
10.4	Tempi di viaggio Scenario 2.2 .....	142
10.5	Tempi di viaggio Scenario 2.3 .....	143
10.6	Diagrammi t-x Scenario 2.2 .....	144
10.7	Diagrammi t-x Scenario 2.3 .....	146
10.8	Calcolo del ritardo per il traffico pedonale .....	147
10.9	Los.....	148
10.9.1	Domanda 100%.....	148
10.9.2	Domanda 90 %.....	149

10.9.3	Domanda 80 %.....	150
10.10	Sviluppi futuri: proposta sistema di monitoraggio .....	150
10.10.1	Funzionamento integrato .....	156
10.10.2	Esempio di funzionamento .....	157

## Indice delle figure

figura 1 Modalità di funzionamento del sistema Utopia.....	37
figura 2 Architettura di Utopia.....	38
figura 3 Ciclo di funzionamento di Utopia .....	39
figura 4 Nodo di porta Maggiore, Roma, Google Maps .....	41
figura 5 intersezioni componenti il nodo di Porta Maggiore .....	41
figura 6 flussi veicolari nel nodo di Porta Maggiore .....	42
figura 7 intersezioni configurate in Omnia-Utopia .....	43
figura 8 strumenti di misura, intersezione Viale Manzoni-Via di Porta Maggiore.....	44
figura 9 intersezione Piazza di Porta Maggiore, particolare sulle sezioni semaforizzate .....	45
figura 10 intersezione Piazza di Porta Maggiore, particolare sui flussi veicolari. (rossi flussi in entrata) .....	45
figura 11 dettaglio di incrocio (Omnia), Piazza di Porta Maggiore.....	46
figura 12 piano semaforico originale, Piazza di Porta Maggiore.....	46
figura 13 intersezione Piazzale Labicano, particolare sui flussi veicolari. (rossi flussi in entrata) ...	48
figura 14 dettaglio di incrocio (Omnia), Piazzale Labicano .....	49
figura 15 piano semaforico originale, Piazzale Labicano .....	49
figura 16 Via Prenestina-deposito ATAC, particolare sui flussi in ingresso .....	50
figura 17 dettaglio di incrocio (Omnia), Via Prenestina-deposito ATAC .....	51
figura 18 piano semaforico originale, Via Prenestina-deposito ATAC .....	51
figura 19 schema dei flussi, Piazza di Santa Croce in Gerusalemme .....	52
figura 20 diagramma di fasatura, Piazza di Santa Croce in Gerusalemme .....	53
figura 21 schema dei movimenti, Piazza di Santa Croce in Gerusalemme.....	53
figura 22 piano semaforico originale, Piazza di Santa Croce in Gerusalemme.....	54
figura 23 traffico rilevato durante la pandemia Covid19, Via Prenestina, anno 2020.....	55
figura 24 riduzione dei flussi veicolari misurati nel 2020 rispetto al 2019.....	55
figura 25 originale matrice dei flussi origine destinazione O/D .....	56
figura 26 matrice ridotta dei flussi origine destinazione O/D.....	56
figura 27 schema dei flussi, nodo di Porta Maggiore .....	56
figura 28 flussi misurati spira SV4 rispetto a flussi da matrice O/D .....	57
figura 29 flussi misurati spira SV1 rispetto a flussi da matrice O/D .....	58
figura 30 flussi misurati spira SV8 rispetto a flussi da matrice O/D .....	59
figura 31 individuazione grafica dei picchi orari giornalieri .....	59

figura 32 matrice O/D, picco orario mattutino.....	60
figura 33 matrice di generazione veicoli ambiente di simulazione Vissim, picco mattutino .....	60
figura 34 matrice O/D, picco orario pomeridiano .....	61
figura 35 matrice di generazione veicoli ambiente di simulazione Vissim, picco pomeridiano .....	61
figura 36 particolare di link di collegamento tra link normali, Vissim (PTV).....	63
figura 37 zone di conflitto, Via Scalo San Lorenzo-Piazzale Labicano .....	63
figura 38 fenomeno di congestione, minuto 15 simulazione Vissim (PTV).....	64
figura 39 sottopasso e accesso al nodo, Via dello Scalo San Lorenzo.....	64
figura 40 modifiche ai link di collegamento, modello V2 e V3 .....	65
figura 41 modifiche ai link di Piazza di Porta Maggiore .....	65
figura 42 modifiche ai link di Piazzale Labicano .....	66
figura 43 modifiche a Piazzale Labicano .....	66
figura 44 parametri di lane change, categoria Urbano motorizzato .....	68
figura 45 parametri di lane change, categoria Urbano reattivo motorizzato.....	68
figura 46 parametri di lane change associati al link di collegamento .....	69
figura 47 espansione del modello con inclusione delle intersezioni adiacenti .....	70
figura 48 parametri di simulazione .....	71
figura 49 gruppo segnale SG8, Piazzale Labicano .....	75
figura 50 attestamento sulle corsie presso la linea di arresto, Via Casilina .....	76
figura 51 schema corridoio Prenestina-Piazza di Porta Maggiore.....	79
figura 52 piano semaforico originale di durata 86 secondi, Via Prenestina-deposito ATAC.....	79
figura 53 piano semaforico di durata 75 secondi, Via Prenestina-deposito ATAC.....	80
figura 54 piano semaforico originale di durata 150 secondi, Piazzale Labicano SG3.....	80
figura 55 piano semaforico modificato di durata 150 secondi, Piazzale Labicano SG3 .....	81
figura 56 piano semaforico originale durata 153 secondi, Piazza di Porta Maggiore .....	81
figura 57 piano semaforico modificato durata 150 secondi, Piazza di Porta Maggiore .....	82
figura 58 coordinazione con rappresentazione delle possibile onde verdi, corridoio Prenestina .....	83
figura 59 schema Corridoio P. Santa Croce in Gerusalemme-Piazzale Labicano .....	84
figura 60 piano semaforico originale di durata 83 secondi, Piazza Santa croce in Gerusalemme.....	85
figura 61 piano semaforico modificato di durata 75 secondi, Piazza Santa croce in Gerusalemme .	85
figura 62 piano semaforico originale di durata 123 secondi, Piazzale Labicano.....	86
figura 63 piano semaforico modificato di durata 150 secondi, Piazzale Labicano.....	86
figura 64 coordinazione con rappresentazione delle possibile onde verdi, corridoio P. Santa Croce in Gerusalemme-Piazzale Labicano .....	87



figura 65 schema corridoio Via di Porta Maggiore.....	88
figura 66 piano semaforico originale durata 132 secondi, Viale Manzoni-via di Porta Maggiore....	89
figura 67 piano semaforico modificato durata 150 secondi, Viale Manzoni-via di Porta Maggiore..	89
figura 68 piano semaforico modificato durata 150 secondi, Piazza di Porta Maggiore .....	90
figura 69 coordinazione con rappresentazione delle possibili onde verdi, corridoio via di Porta Maggiore .....	90
figura 70 grado di coordinazione Corridoio Casilina, Scenario 2.2.....	93
figura 71 piano semaforico Scenario 2.1 di durata 150 secondi, Piazzale Labicano .....	95
figura 72 piano semaforico Scenario 2.3 di durata 150 secondi, Piazzale Labicano .....	96
figura 73 coordinazione Corridoio Eleniana (SG9, Piazzale Labicano), Scenario 2.3 .....	96
figura 74 veicoli in coda e non simulati, Via dello Scalo San Lorenzo .....	99
figura 75 lunghezza media della coda, Via dello Scalo San Lorenzo .....	99
figura 76 ritardo medio per veicolo, Via dello Scalo San Lorenzo.....	100
figura 77 velocità media per veicolo, Via dello Scalo San Lorenzo .....	100
figura 78 coda all'istante 4000s della simulazione in Via dello Scalo San Lorenzo, Scenario 2.3 .	101
figura 79 veicoli in coda e non simulati, Via Casilina .....	102
figura 80 lunghezza della coda media, via Casilina.....	103
figura 81 ritardo medio per veicolo, via Casilina.....	103
figura 82 velocità media per veicolo, via Casilina.....	104
figura 83 coda all'istante 4000s della simulazione in Via Casilina, Scenario 2.3 .....	104
figura 84 lunghezza della coda media, Via Prenestina .....	105
figura 85 ritardo medio per veicolo, via Prenestina .....	106
figura 86 velocità media per veicolo, via Prenestina .....	106
figura 87 velocità media per veicolo, via Eleniana .....	107
figura 88 ritardo medio per veicolo, via Eleniana.....	107
figura 89 lunghezza della coda media, via Eleniana.....	108
figura 90 lunghezza della coda media, Piazzale Labicano SG9 .....	108
figura 91 lunghezza della coda media, via di Porta Maggiore.....	109
figura 92 ritardo medio per veicolo, via di Porta Maggiore.....	109
figura 93 velocità media per veicolo, via di Porta Maggiore.....	110
figura 94 veicoli simulati nel nodo di Porta Maggiore .....	111
figura 95 ritardo medio per veicolo, nodo di Porta Maggiore .....	112
figura 96 numero totale di fermate, nodo di Porta Maggiore.....	112
figura 97 emissioni di CO, nodo di Porta Maggiore .....	113

figura 98 emissioni di NOX, nodo di Porta Maggiore .....	113
figura 99 emissioni di VOC, nodo di Porta Maggiore .....	113
figura 100 consumo di carburante, nodo di Porta Maggiore.....	114
figura 101 schema gruppi segnale per attraversamenti pedonali, Piazza di Porta Maggiore.....	115
figura 102 gruppi segnale per attraversamenti pedonali, Piazzale Labicano .....	116
figura 103 ritardo pedonale, Piazza di Porta Maggiore SG 7 .....	116
figura 104 ritardo pedonale, Piazza di Porta Maggiore SG 8 .....	117
figura 105 ritardo pedonale, Piazzale Labicano SG 10.....	117
figura 106 ritardo pedonale, Piazzale Labicano SG 11 .....	118
figura 107 schema del nodo per il calcolo del LOS .....	119
figura 108 HCM Level of service criteria .....	120
figura 109 domanda 90% simulazione scenario 2.3 secondo 4000 .....	121
figura 110 domanda 80% simulazione scenario 2.3 secondo 4000 .....	121
figura 111 ritardo pesato sui flussi per via di accesso, Scenario 1.....	122
figura 112 ritardo pesato sui flussi per via di accesso, Scenario 2.1.....	122
figura 113 ritardo pesato sui flussi per via di accesso, Scenario 2.2.....	122
figura 114 ritardo pesato sui flussi per via di accesso, Scenario 2.3.....	122
figura 115, schema di funzionamento di una spira ad induzione.....	130
figura 116 componenti del sistema veicoli sonda-rete.....	137
figura 117 esempio di calcolo del grado di coordinazione .....	139
figura 118 coordinazione corridoio Prenestina, Scenario 2.2 .....	144
figura 119 coordinazione corridoio Eleniana, Scenario 2.2.....	144
figura 120 coordinazione corridoio di Via di Porta Maggiore, Scenario 2.2.....	145
figura 121 coordinazione corridoio Prenestina, Scenario 2.3 .....	146
figura 122 coordinazione corridoio Eleniana, Scenario 2.3.....	146
figura 123 coordinazione corridoio di Via di Porta Maggiore, Scenario 2.3.....	147
figura 124 telecamera 10/11, Piazza di Porta Maggiore .....	151
figura 125 telecamera 10/12, Piazzale Labicano .....	151
figura 126 telecamera 10/13, Piazzale Labicano .....	151
figura 127 planimetria della posizione delle telecamere istallate .....	152
figura 128 rilevamento delle telecamere: categorizzazione dei flussi e conteggio.....	152
figura 129 nodo di Porta Maggiore, posizione indicativa dei dispositivi Bluetooth.....	153
figura 130 Via Prenestina, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth .....	154
figura 131 Via Statilia, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth.....	154

figura 132 Via di Porta Maggiore, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth .....	154
figura 133 Via Giolitti, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth .....	155
figura 134 Via dello Scalo San Lorenzo, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth.....	155
figura 135 Via Casilina, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth.....	156
figura 136 Via Eleniana, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth.....	156
figura 137 posizione dei dispositivi e delle sezioni di rilevamento .....	157
figura 138 schema esempio di origini-destinazioni tra MAC-ID rilevati .....	158
figura 139 matrice O/D per O:Via Prenestina.....	158
figura 140 matrice O/D derivata dai MAC-ID (bluetooth).....	159
figura 141 esempio di flussi rilevati.....	159
figura 142 esempio di matrice O/D dei flussi rilevati.....	159
figura 143 dashboard 1: status dei dispositivi di conteggio .....	160
figura 144 dashboard 2: conteggio e categorizzazione, per ciascun dispositivo di rilevamento veicoli .....	160
figura 145 dashboard 3: status dei bluetooth e dati rilevati .....	161
figura 146 dashboard 4: matrici ottenute .....	161

## Indice delle Tabelle

Tabella 1 Confronto tra principali Sistemi di gestione del traffico.....	40
Tabella 2 gruppi segnale (SG), Piazza di porta Maggiore .....	47
Tabella 3 gruppi segnale (SG), Piazzale Labicano .....	50
Tabella 4 flussi misurati spira SV4 rispetto a flussi da matrice O/D.....	57
Tabella 5 flussi misurati spira SV1 rispetto a flussi da matrice O/D.....	58
Tabella 6 flussi misurati spira SV8 rispetto a flussi da matrice O/D.....	59
Tabella 7 veicoli rilevati in ingresso al nodo, Scenario1 .....	73
Tabella 8 analisi dei veicoli, Via Scalo S. Lorenzo e Via Casilina, Scenario 1.....	73
Tabella 9 parametri del traffico misurati a livello di intera rete, Scenario 1 .....	73
Tabella 10 lunghezza delle code, Scenario 1 .....	74
Tabella 11 ritardo relativo alle singole vie di accesso, Scenario 1 .....	74
Tabella 12 emissioni e consumi nel nodo, Scenario 1 .....	74
Tabella 13 valori del ciclo semaforico per Via Casilina (SG8).....	75
Tabella 14 confronto tra capacità e domanda, Via Casilina (SG8).....	75
Tabella 15 valori del ciclo derivati dalla reale portata di saturazione, Via Casilina.....	76
Tabella 16 valori del ciclo semaforico (SG1 Piazza Porta Maggiore) per Via dello Scalo San Lorenzo .....	77
Tabella 17 confronto tra capacità e domanda, Via dello Scalo San Lorenzo .....	77
Tabella 18 gruppi segnali successivi, Corridoio Prenestina-Piazza di Porta Maggiore.....	79
Tabella 19 offset corridoio Prenestina-Piazza di Porta Maggiore .....	82
Tabella 20 gruppi segnali successivi, Corridoio P. Santa Croce in Gerusalemme-Piazzale Labicano .....	84
Tabella 21 offset Corridoio P. Santa Croce in Gerusalemme-Piazzale Labicano .....	87
Tabella 22 successione dei gruppi segnale, corridoio Via di Porta Maggiore.....	88
Tabella 23 offset corridoio via di Porta Maggiore.....	90
Tabella 24 veicoli rilevati in ingresso al nodo, Scenario 2.1 .....	91
Tabella 25 analisi dei veicoli, Via Scalo S. Lorenzo e Via Casilina, Scenario 2.1.....	91
Tabella 26 parametri del traffico misurati a livello di intera rete, Scenario 2.1 .....	91
Tabella 27 lunghezza delle code, Scenario 2.1 .....	91
Tabella 28 ritardo relativo alle singole vie di accesso, Scenario 2.1 .....	92
Tabella 29 emissioni e consumi nel nodo, Scenario 2.1 .....	92
Tabella 30 offset ricalibrati, Scenario 2.2 .....	92

Tabella 31 veicoli rilevati in ingresso al nodo, Scenario2.2 .....	94
Tabella 32 analisi dei veicoli, Via Scalo S. Lorenzo e Via Casilina, Scenario 2.2.....	94
Tabella 33 parametri del traffico misurati a livello di intera rete, Scenario 2.2 .....	94
Tabella 34 lunghezza delle code, Scenario 2.2 .....	94
Tabella 35 ritardo relativo alle singole vie di accesso, Scenario 2.2 .....	94
Tabella 36 emissioni e consumi nel nodo, Scenario 2.2 .....	94
Tabella 37 veicoli rilevati in ingresso al nodo, Scenario2.3 .....	97
Tabella 38 analisi dei veicoli, Via Scalo S. Lorenzo e Via Casilina, Scenario 2.3.....	97
Tabella 39 parametri del traffico misurati a livello di intera rete, Scenario 2.3 .....	97
Tabella 40 lunghezza delle code, Scenario 2.3 .....	97
Tabella 41 ritardo relativo alle singole vie di accesso, Scenario 2.3 .....	97
Tabella 42 emissioni e consumi nel nodo, Scenario 2.3 .....	97
Tabella 43 domanda veicolare, via Scalo dello Scalo San lorenzo.....	98
Tabella 44 rapporto tra veicoli non simulati e domanda generata, Via dello Scalo San Lorenzo ....	99
Tabella 45 rapporto tra veicoli non simulati e domanda generata, Via Casilina .....	102
Tabella 46 veicoli simulati nel nodo di Porta Maggiore.....	111
Tabella 47 emissioni e consumi di carburante, nodo di Porta Maggiore.....	112
Tabella 48 gruppi segnale per attraversamenti pedonali, Piazza di Porta Maggiore .....	115
Tabella 49 gruppi segnale per attraversamenti pedonali, Piazzale Labicano .....	115
Tabella 50 impatto dei nuovi piani semaforici sulla categoria pedonale, Piazza di Porta Maggiore .....	116
Tabella 51 impatto dei nuovi piani semaforici sulla categoria pedonale, Piazzale Labicano.....	117
Tabella 52 LOS nodo di Porta Maggiore con 100% della domanda .....	120
Tabella 53 LOS nodo di Porta Maggiore con 90% della domanda .....	120
Tabella 54 LOS nodo di Porta Maggiore con 80% della domanda .....	121
Tabella 55 esempio di calcolo del grado di coordinazione.....	139
Tabella 56 tempi di viaggio tra sezioni nel nodo di Porta Maggiore, Scenario 1 .....	140
Tabella 57 tempi di viaggio tra sezioni nel nodo di Porta Maggiore, Scenario 2.1 .....	141
Tabella 58 tempi di viaggio tra sezioni nel nodo di Porta Maggiore, Scenario 2.2.....	142
Tabella 59 tempi di viaggio tra sezioni nel nodo di Porta Maggiore, Scenario 2.3.....	143
Tabella 60 LOS scenario 1 (domanda 100%).....	148
Tabella 61 LOS scenario 2.1 (domanda 100%).....	148
Tabella 62 LOS scenario 2.2 (domanda 100%).....	148
Tabella 63 LOS scenario 2.3 (domanda 100%).....	148

Tabella 64 LOS scenario 1 (domanda 90%) .....	149
Tabella 65 LOS scenario 2.1 (domanda 90%) .....	149
Tabella 66 LOS scenario 2.2 (domanda 90%) .....	149
Tabella 67 LOS scenario 2.3 (domanda 90%) .....	149
Tabella 68 LOS scenario 1 (domanda 80%) .....	150
Tabella 69 LOS scenario 2.1 (domanda 80%) .....	150
Tabella 70 LOS scenario 2.2 (domanda 80%) .....	150
Tabella 71 LOS scenario 2.3 (domanda 80%) .....	150

## **1 Scopo della tesi**

Lo studio di tesi magistrale riportato in questo documento è frutto della collaborazione tra Politecnico di Torino e Swarco Mizar s.r.l.

Lo scopo principale dello studio consiste nella modellazione di un sistema di gestione del controllo semaforico di tipo tradizionale a fasi di durata fissa, che consideri l'ottimizzazione delle prestazioni del flusso veicolare garantendo un'adeguata sicurezza ed un impatto limitato per le categorie di mobilità debole, soprattutto per la categoria dei pedoni. In particolare, è stato analizzato il caso studio di una porzione di rete stradale nella città di Roma (RM), presso il monumento di Porta Maggiore. Tale incrocio è composto da due intersezioni principali, Piazzale Labicano e Piazza di Porta Maggiore, dove le categorie di traffico pedonale e veicolare sono presenti entrambe con volume considerevole, ed inoltre è interessato da importanti linee del trasporto pubblico urbano. Queste ultime saranno considerate nell'analisi perché presenti nell'area di studio, sebbene la loro gestione non sia trattata nello specifico. Obiettivo principale è quello di migliorare il deflusso veicolare privato nel nodo, analizzando in particolare la variazione di domanda giornaliera e la possibilità di definire una gestione dei semafori a selezione di piano, adeguando la struttura del piano di controllo. Verrà altresì valutata l'ottimizzazione della regolazione semaforica attraverso l'utilizzo di una gestione di tipo adattativo con la creazione di fasi a chiamata per le principali linee di trasporto pubblico.

L'analisi è stata svolta in ambiente di simulazione VISSIM, software sviluppato da PTV, con un approccio di micro-simulazione di scenari di traffico e fornito per questo studio da Swarco Mizar s.r.l.

## 2 Introduzione

La richiesta di mobilità è in aumento sin dall'urbanizzazione conseguente alla seconda rivoluzione industriale; questo fenomeno a livello mondiale non si è registrato contemporaneamente: in Europa e negli Stati Uniti si è osservata una rapida crescita della domanda di mobilità dopo il Secondo Conflitto Mondiale mentre in altri Paesi, come Cina e Paesi del golfo Persico, il fenomeno è più recente e la crescita più rapida.

La crisi energetica degli anni '70, l'accresciuta importanza delle preoccupazioni ambientali e le limitate risorse economiche e fisiche sono tra le ragioni più importanti per cui un approccio di espansione delle infrastrutture di trasporto non può continuare ad essere l'unica risposta alle sempre crescenti esigenze di trasporto e mobilità delle società moderne. Il trasporto efficiente, sicuro e meno inquinante di persone e merci richiede un utilizzo ottimale delle infrastrutture disponibili attraverso un'applicazione adeguata di una varietà di strategie di controllo del traffico. [1]

La filosofia moderna nell'ambito dei trasporti si basa sulla ricerca di opzioni più avanzate per la gestione del traffico stradale, come l'introduzione di nuove tecnologie nel campo delle telecomunicazioni per lo scambio di dati ed informazioni e l'utilizzo di sistemi ITS. [2]

Va precisato che in realtà la mobilità ha subito una recente diminuzione, da imputarsi tuttavia al particolare momento storico coincidente con il perdurare della Pandemia Covid-19. Durante la recente crisi finanziaria si è assistito infatti ad una decrescita nella produzione e vendita di veicoli per la prima volta dopo il picco registrato nel 2017, pari a 80 milioni di autovetture vendute in un anno. [3]

L'aumento dei veicoli a discapito di un sistema infrastrutturale spesso rimasto invariato ha portato a fenomeni di congestione e a problemi legati al traffico crescente che richiedono una adeguata gestione. Inoltre, i metodi di controllo del traffico tradizionale sono diventati inadeguati per gestire il traffico veicolare ad alta intensità, essendo quest'ultimo caratterizzato anche da condizioni estremamente variabili nel tempo. [4]

Negli ultimi decenni ha assunto maggiore rilevanza anche l'aspetto ambientale: la congestione del traffico urbano, la scarsità di terreno edificabile e l'inquinamento urbano causato dalle emissioni di sostanze inquinanti, nonché l'inquinamento acustico provocato dal traffico, influenzano la salute dei cittadini e il rapido ed armonioso sviluppo delle città.[5] Uno Studio del 2004 condotto negli Stati Uniti ha sottolineato come la congestione abbia contribuito a circa il 33 % delle emissioni inquinanti nell'anno precedente, creando gravi problemi di salute e sicurezza.[4]

La congestione del traffico inoltre porta a situazioni critiche quando un veicolo di emergenza è in missione. In tale scenario, i ritardi non sono tollerabili. I metodi moderni di gestione pertanto prevedono che venga garantita la priorità al veicolo di emergenza. Ciò presuppone un cambio di fasi



semaforiche per adattarle al veicolo individuato, in automatico con sistemi AVL (Automatic Vehicle Localisation) o attraverso una richiesta da operatore, per garantire al veicolo la priorità all'intersezione. [6]

Similmente, è importante garantire la priorità per la categoria dei mezzi pubblici, in modo da fornire un servizio preciso e con ritardi accettabili per l'utenza.

Dal punto di vista economico, la congestione e il conseguente ritardo, hanno effetti negativi poiché riducono il tempo che l'utenza vorrebbe dedicare allo svolgimento delle attività, impegnandone una parte, maggiore rispetto alle previsioni, per lo spostamento stesso. Le attività che creano la necessità di spostarsi e sono quindi alla base della domanda di mobilità possono essere di tipo lavorativo e/o ricreativo; secondo un approccio di analisi costi-benefici, infatti, entrambe le tipologie di attività sono monetizzabili e quindi comportano una perdita economica. Per comprenderne l'entità, il rapporto dell'INRIX afferma che nel 2013 la congestione del traffico negli Stati Uniti è stata di circa 124 miliardi di dollari, tra perdite dirette e indirette, e si stima che tale importo aumenterà del 50% entro il 2030. [4].

In Europa la situazione è in linea con quella americana: la seguente dichiarazione inclusa nel "*Libro bianco della Commissione europea sulla politica europea dei trasporti per il 2010*": "a causa della congestione, c'è un serio rischio che l'Europa perda competitività economica. L'ultimo studio in materia ha dimostrato che i costi esterni della congestione del traffico stradale rappresentano da soli lo 0,5 per cento del PIL comunitario. Le previsioni di traffico per i prossimi 10 anni mostrano che, se non si agirà, la congestione stradale aumenterà significativamente entro il 2010. I costi attribuibili alla congestione aumenteranno anche del 142% fino a raggiungere gli 80 miliardi l'anno, che è circa l'1% del PIL comunitario".[1]

Dal punto di vista della gestione del traffico si parlerà quindi di efficienza per riferirsi alla relazione ritardo-veicoli: l'efficienza è alta quando il sistema di controllo riduce il ritardo per il flusso veicolare. Un secondo aspetto fondamentale è la sicurezza, relativa a tutte le categorie di traffico, ma soprattutto a quelle definite come "mobilità debole". Questa classe comprende le categorie di pedoni e ciclisti, e i nuovi sistemi di trasporto recentemente in crescita, come i monopattini elettrici; queste categorie sono esposte a danni, in caso di incidente, in maniera decisamente più seria rispetto al traffico veicolare. L'esposizione maggiore comporta un rischio maggiore, anche in presenza di intersezioni semaforizzate: una statistica relativa agli incidenti, fornita dalla polizia stradale di Singapore, indica come il 22% degli incidenti mortali dei pedoni si verifica in presenza di passaggi pedonali con segnale semaforico[7].

### 3 Sistemi di controllo del traffico

#### 3.1 Concetti Base sulla circolazione stradale

La rete stradale è composta dalle strutture e dalle infrastrutture che creano nel loro insieme un sistema interconnesso di strade, con la funzione di collegamento tra poli produttivi ed attrattivi in un territorio, e che permette agli utenti di spostarsi per svolgere in questi ultimi delle attività di natura economica e\o di altra natura.

La strada è definita dal DM 6792 del 2001 come l'area ad uso pubblico destinata alla circolazione di pedoni e veicoli.

La rete si compone di diverse categorie di strade individuate secondo alcuni aspetti principali, quali l'entità degli spostamenti che permettono, il tipo di movimento servito, la funzione di collegamento tra realtà territoriali (regionale, nazionale, comunale) e le componenti del traffico che tale strada può servire. Di particolare importanza per il contesto della gestione del traffico è l'aspetto di classe funzionale, che dipende dal tipo di movimento servito. Quest'ultimo può essere di transito, di distribuzione, di penetrazione o di accesso. Secondo tali tipologie, le strade assumono diverse categorie, a cui fanno riferimento le normative vigenti a livello progettuale e gestionale.

Per l'aspetto gestionale, l'obiettivo è garantire un buon livello di servizio per gli utenti, utilizzando approcci dipendenti dalla classe funzionale. Il livello di servizio è una stima della qualità del risultato ottenuto o di una condizione osservata. È un metodo diffuso ampiamente utilizzato nel mondo dei trasporti, anche nel *HCM (High Capacity Manual)*, per individuare un set di valori soglia e i conseguenti livelli di qualità.

Per le arterie con funzione di transito e distribuzione si privilegiano prestazioni ad alto livello di servizio, volendo realizzare una condizione di flusso ininterrotto, per garantire velocità adeguate e flussi scorrevoli, mentre per le classi funzionali di penetrazione ed accesso, queste condizioni sono meno facili da ottenere. Il flusso ininterrotto si riesce ad ottenere in arterie stradali extraurbane e in arterie urbane di tipo autostradale, dove l'infrastruttura presenta caratteristiche geometriche finalizzate a realizzare, per la maggior distanza possibile, il minor numero di punti di conflitto. Quest'ultimi sono le rampe di accesso, le svolte e i restringimenti di corsia. L'interruzione dello scorrimento o il rallentamento in un flusso ininterrotto è dovuto a condizioni interne al flusso stesso, come un aumento eccessivo del volume veicolare. [8]

Il flusso interrotto invece è la condizione di flusso che si osserva frequentemente in ambito urbano, tipicamente per le strade che hanno la funzione di penetrazione ed accesso. Per esse, infatti aumentano i punti di conflitto quali svolte, corsie in ingresso e in uscita, intersezioni a raso. Quest'ultime sono definite dal *Codice Della Strada* come "area comune a più strade, organizzata in modo da consentire

lo smistamento delle correnti di traffico dall'una all'altra di esse". Le intersezioni spesso sono semaforizzate: la presenza dei dispositivi di controllo realizza una condizione di "influenza esterna" alle condizioni del flusso. L'esternalità della condizione influente sul traffico è la caratteristica che differenzia il flusso interrotto rispetto al flusso ininterrotto.

Nel presente Studio è stato oggetto di analisi la gestione del traffico veicolare in presenza di intersezioni semaforizzate, pertanto un'infrastruttura a deflusso di tipo interrotto.

### 3.2 Variabili del traffico

Per lo studio delle prestazioni e dell'efficacia di qualsiasi strategia venga implementata in un contesto di rete urbana, è utile richiamare quali sono le principali variabili, parametri e definizioni del traffico. Il *Codice della Strada* definisce una corrente di traffico come "insieme di veicoli (corrente veicolare), o pedoni (corrente pedonale), che si muovono su una strada nello stesso senso di marcia su una o più file parallele, seguendo una determinata traiettoria."

La presenza del veicolo è una variabile booleana che indica presenza o assenza di un veicolo in un determinato punto della strada. La presenza del veicolo è rilevata attraverso sensori e strumenti di rilevamento. [4]

Si definisce il flusso  $Q$  come il numero di veicoli che attraversano un determinata sezione  $N$  in un intervallo di tempo  $T$ , per cui risulta:

$$Q = \frac{N}{T}$$

$N$  risulta essere una sezione trasversale specifica sulla carreggiata corrispondente alla stazione fissa di misura, rappresentata dalla posizione dello strumento di rilevamento o dall'area di rilevamento nel caso dell'utilizzo di videocamere.[4] Il flusso può essere riferito alla carreggiata o alla singola corsia, e può anche essere definito come volume. [4]

La velocità  $V$  del flusso veicolare non è una grandezza univoca; la definizione di rilevamento automatico della velocità utilizza la legge

$$V = (3,6 \times 10^3 d) \div (t_u - t_d)$$

dove  $d$  è la distanza tra due rivelatori successivi e  $t_u$  e  $t_d$  sono rispettivamente i tempi di attivazione del rivelatore a monte ( $u = \text{upstream}$ ) e quello a valle ( $d = \text{downstream}$ ); la velocità del flusso di traffico è misurata come media delle velocità dei veicoli che attraversano una sezione specifica o come media armonica delle velocità dei veicoli. [4]

La distanza tra i fronti di due veicoli successivi nella stessa corsia è chiamata Headway; il tempo che intercorre tra il passaggio del fronte di due veicoli successivi per la stessa sezione prende il nome di Gap temporale. [4]

La densità  $K$  è il numero di veicoli in una corsia per unità di lunghezza. Può essere dedotta con il conteggio dei veicoli presenti in una unità di lunghezza della carreggiata, fotografata in un certo istante di tempo. [4]

Queste variabili sono tra esse legate dall'equazione di stato, e in particolare il loro legame è rappresentato nell'equazione fondamentale:

$$Q = K \times V_s$$

Dove  $V_s$  è la velocità media del traffico.

Il flusso è legato alla velocità e alla densità sulla corsia: in particolare il numero di veicoli che attraversa un'intersezione aumenta con il diminuire dell'Headway tra di essi, fino ad un valore limite detto capacità; la capacità, solitamente indicata con  $C$ , è il massimo valore di flusso definito stabile per cui la corrente veicolare si sposta ad una velocità ridotta, ma senza fermate o code. Se il flusso aumenta si raggiunge un fenomeno di flusso instabile dove la densità aumenterà e la velocità diminuirà fino alla formazione di code: sarà osservata in tal caso una modalità di spostamento definita nella letteratura "stop&go", ovvero un continuo alternarsi di brevi spostamenti e fermate. [8]

Per definizione, nel caso di flusso interrotto queste leggi non sono totalmente valide, poiché si assiste alla formazione di code dovute alla presenza dell'intersezione. La coda è formata dai veicoli che sono in attesa di attraversare un'intersezione e si assestano in attesa in una corsia specifica; la lunghezza della coda è ottenuta misurando dalla linea di arresto la successione di veicoli fermi a monte. [4]

La condizione di flusso ipersaturo o sovrasaturo in un punto specifico della carreggiata (come la corsia di accesso all'intersezione) è la situazione in cui la domanda in quel punto supera la capacità [4]; questa definizione vale sia nel caso di flusso interrotto che ininterrotto.

### 3.3 Parametri dei controllori

Il traffico alle intersezioni è gestito dai controllori del traffico secondo alcune strategie di controllo. I controllori sono anche detti semafori o segnali luminosi.

La combinazione di strategie e dispositivi di controllo, ed eventualmente sensori e altri strumenti, costituiscono il sistema di controllo del traffico, anche definito sistema di gestione del traffico.

I controllori sono il mezzo tramite cui le decisioni, calcolate dai modelli e dai software del sistema di controllo, vengono comunicate all'utenza. I controllori comunicano quindi attraverso un segnale luminoso, di colore opportuno, l'azione che l'utente può effettuare.

A livello di strategia i controllori attuano alcuni piani di controllo calcolati e che possiedono alcune caratteristiche specifiche, definite parametri dei controllori. I principali sono la fase, la lunghezza del ciclo e l'offset.

La fase è la combinazione dei movimenti permessi in contemporanea nella sezione interna dell'intersezione, in cui i flussi veicolari e pedonali compatibili possono attraversare senza conflitti. [4] [7]; sono definiti compatibili i flussi che per geometria dell'intersezione non possono entrare in conflitto e pertanto possono svolgersi in contemporaneo. [7] [9] La fase si traduce quindi in un segnale luminoso comune per le manovre compatibili.

La lunghezza del ciclo è la durata totale in secondi perché il segnale semaforico ripeta una sequenza completa di fasi. [4]

L'offset è l'intervallo temporale che intercorre tra due successivi piani di controllo delle intersezioni. [4] In realtà quindi l'offset è un parametro dei controllori che interessa due o più intersezioni. L'ottimizzazione del tempo di offset e della durata del ciclo delle intersezioni crea la condizione di coordinazione tra di esse ed è utile per creare strategie di onda verde. L'onda verde è una strategia per il coordinamento tra intersezioni, attuato dai sistemi di controllo per intersezioni multiple. Consiste nel sincronizzare i tempi di verde per consentire ad una corrente di veicoli che viaggiano in una direzione di attraversare più intersezioni senza fermarsi, ovvero senza incontrare la fase di rosso. È una strategia utilizzata anche per favorire il passaggio dei veicoli di emergenza in missione. In generale per il comune traffico veicolare è usata per aumentare il flusso servito nelle direzioni principali (arterie principali). [4]

Si definisce tempo perso la durata del tempo di una fase non utilizzata da veicoli e/o pedoni per attraversare un'intersezione. Un sistema di controllo del traffico ad un incrocio assegna una certa quantità di tempo verde ad una fase specifica durante un ciclo, in modo che i veicoli e i pedoni possano attraversare in sicurezza un incrocio. [4]

### 3.4 Sistemi di controllo del traffico

Si definisce sistema di controllo l'insieme delle strategie di controllo e degli strumenti di controllo. Questi ultimi sono i controllori, anche definiti semafori o segnali luminosi.

Ulteriori strumenti possono essere installati a completamento dei sistemi di controllo: sistemi di videosorveglianza, video-rilevamento, strumenti per la rilevazione dei dati di traffico (spire induttive\spire virtuali) e sensori di varia natura (ad esempio rilevatori di parametri ambientali).

La gestione degli strumenti e delle strategie di controllo avviene attraverso alcune piattaforme in modo automatico o tramite operatori appositamente formati. Alcuni sistemi di controllo possono prevedere anche il controllo in locale se il semaforo è dotato di tale modalità: singoli controllori o piccoli gruppi di essi possono essere gestiti tramite software locali definiti SPOT (Sistema per Priorità e Ottimizzazione del Traffico). Alcuni sistemi di controllo possono anche essere gestiti in modo manuale: un operatore può accedere al controllore in loco e modificare la durata di una fase per ottimizzare il deflusso della corrispondente corrente veicolare.

Gli strumenti di controllo hanno l'obiettivo di attuare la strategia di gestione del traffico. Le strategie di controllo sono molteplici poiché diversi sono gli obiettivi che possono essere perseguiti. Gli obiettivi principali sono analizzati nel paragrafo "Obiettivi dell'ottimizzazione". La modellazione di un sistema di controllo che vada ad ottimizzare le fasi semaforiche è il metodo più diffuso di gestione di problematiche di traffico urbane, in quanto fornisce un risultato ottimo in termini di rapporto costi-effetti.[10]

Il problema di ottimizzazione dei flussi stradali in una rete è un problema complesso. La sua complessità deriva da diversi aspetti: il traffico è influenzato da aspetti comportamentali, diversi per ogni categoria di utenza, non facili da modellare. Alcune condizioni esterne influenzano il traffico: le condizioni meteo, eventi perturbanti come incidenti e lavori in corso, le variazioni stagionali e/o a lungo termine nella distribuzione del traffico e nel volume di traffico.

Per studiare in modo realistico una rete con diverse categorie di flussi coinvolti, occorre modellare l'interazione tra veicoli, e tra veicoli e altre categorie coinvolte.

Nei successivi paragrafi si analizzano le proprietà dei sistemi di controllo moderni e i principali sistemi utilizzati nel settore negli ultimi anni.

### 3.4.1 Proprietà dei sistemi di controllo

La maggior parte dei sistemi di controllo attualmente utilizzati hanno alcune semplificazioni introdotte, che possono essere limitanti in occasione di scenari ed analisi specifiche. Il caso studio diviene quindi il discriminante per la scelta del sistema di controllo. Questa scelta nella pratica deve considerare inoltre gli obiettivi da raggiungere, la disponibilità di risorse ed i vincoli che ogni sistema introduce. Sono a seguito riportati alcune delle caratteristiche che differenziano i sistemi di controllo:

- Staticità: non si adattano alla repentina modificazione delle variabili del traffico che si osservano in tempo reale [1].
- La maggior parte delle attuali UTC (Unit of Traffic Control) non sono state verificate in caso di guasti: a seconda della struttura hardware presente, in occasione di guasti del sistema o momentanea interruzione delle comunicazioni tra sistema centrale e unità su strada, devono essere previste procedure per il riavvio automatico e per la momentanea funzione in locale, anche se meno efficiente (come il passaggio da adattativo ad una selezione di piano con piani preimpostati) [4].
- Molti UTC (Unit of Traffic Control) attuali favoriscono il traffico veicolare, con poca considerazione per la mobilità pedonale che potrebbe indulgere in comportamenti non sicuri [4].
- Spesso gli utenti non sono informati sull'attuale o prossima situazione di traffico: questo aspetto non è legato direttamente al sistema di controllo, ma alla fruibilità delle informazioni da parte dell'utenza. Un servizio di informazione, ad esempio con sistema di PMV (pannello a messaggio variabile), migliora indirettamente le prestazioni del sistema di controllo poiché influenza la scelta del percorso fatta dall'utenza [4].
- La maggior parte dei controllori del traffico non ha capacità autonome e di autocorrezione\ricalibrazione automatica: non autocorreggono e non adattano in automatico le proprie funzioni o stato, perdendo di efficacia nella gestione per anche lunghi intervalli di tempo [4].

Le proprietà che il sistema di controllo ideale dovrebbe avere per superare le già menzionate criticità sono soprattutto alcune proprietà intrinseche nella sua architettura. Le proprietà fondamentali da garantire sono:

- conoscenza del contesto;
- sicurezza dei sottosistemi;
- affidabilità e adattabilità in tempo reale dei dati e dei punti di controllo\attuazione;

In questo modo la gestione del traffico considera la sicurezza degli utenti e ottiene strategie ottimizzate in tempo reale, per la proprietà di conoscenza del contesto in tempo reale, per le intersezioni coinvolte nell'analisi.[4]

Si rende necessario, per garantire tali proprietà, l'utilizzo di nuovi sistemi di controllo del traffico urbano per garantire la conoscenza del contesto i sistemi di controllo devono essere completati con l'installazione di rilevatori e altri strumenti.



### 3.4.2 Obiettivi dell'ottimizzazione

Gli obiettivi dell'ottimizzazione dei sistemi di controllo sulla rete sono molteplici. Solitamente il raggiungimento di tali obiettivi viene misurato attraverso alcuni valori dei parametri del traffico, o grandezze da essi derivate, che possiamo indicare come Parametri o Indici (indicatori) di performance (KPI, Key Performance Indicator od index). Tali parametri possono essere valori di soglia, livelli di servizio o di altra natura, e rappresentano la qualità o una particolare condizione del deflusso veicolare in tempo reale (o in un certo intervallo di tempo). I KPI possono essere parametri per valutare la condizione del traffico in modo assoluto o in modo relativo rispetto ad un target imposto.

La gestione del traffico, nel garantire la sicurezza per tutte le categorie di utenza coinvolte, deve prima di tutto garantire la riduzione del tempo di viaggio dei veicoli di emergenza. Ulteriori obiettivi perseguibili possono essere concordati con l'amministrazione pubblica che intende installare il sistema di gestione del traffico, fra cui si citano:

- Minimizzare il ritardo dei veicoli privati;
- Minimizzare il totale dei tempi di viaggio in una rete (o in una porzione di essa);
- Minimizzare il totale dei tempi di percorrenza di specifiche categorie di veicoli;
- Garantire la priorità a tipologie di veicoli;
- Massimizzare la capacità;
- Minimizzare le emissioni di sostanze inquinanti;
- Ridurre l'energia utilizzata per gli spostamenti;

Un sistema sarà tanto più efficiente quanti più obiettivi verranno raggiunti. Non tutti gli obiettivi sono indipendenti, e non tutti sono da considerarsi in ogni sistema. Andrebbe stabilito, prima della fase di modellazione e simulazione, quali obiettivi sono principali e quali secondari, in modo da individuare una struttura multi-obiettivo ben definita.[4] Tale struttura deve pertanto presentare una gerarchizzazione tra obiettivi principali e secondari. Questa proprietà è solitamente raggiunta impostando una struttura multi-obiettivo con un sistema interno di ponderazione tra i singoli obiettivi. Le strategie di controllo spesso si differenziano per l'attitudine che hanno a soddisfare specifici obiettivi.

Alcuni KPI, come quelli legati agli aspetti ambientali (emissioni di inquinanti e utilizzo di combustibile) richiedono che il tempo di osservazione ed analisi sia adeguato. Per tale motivo, e per perseguire un'analisi relativamente ad aspetti più legati all'effetto sulla viabilità della congestione, in questo studio non sono stati presi in considerazione gli obiettivi legati al clima e alle emissioni.

Gli obiettivi del presente studio di tesi sono descritti nel seguente paragrafo.

### **3.4.2.1 Obiettivi considerati nel presente studio**

Come descritto nel capitolo 1. Scopo della Tesi, l'obiettivo di questo Studio è quello di fornire un'analisi con l'obiettivo principale di aumentare la sicurezza delle categorie di mobilità debole, in particolare pedonale, e di garantire al contempo prestazioni di buon livello per il flusso veicolare.

Pertanto, gli obiettivi principali saranno:

- Minimizzare il ritardo dei veicoli privati;
- Aumentare la sicurezza di alcune categorie di utenza (pedoni);

Gli obiettivi secondari saranno:

- Massimizzare la capacità;
- Garantire la priorità ad alcune tipologie di veicoli;

Sebbene la sicurezza del flusso pedonale sia un obiettivo principale esplicito da raggiungere, la sicurezza è assicurata dal controllo anche per le altre categorie di utenza coinvolte nell'analisi.

## **3.5 Sistemi di controllo e gestione del traffico**

La gestione delle intersezioni di una rete dipende dalle caratteristiche della stessa, in termini di traffico e sistemi presenti, e dalle decisioni della Pubblica Amministrazione che gestisce la rete.

Le modalità di controllo delle intersezioni si dividono in due classi principali, individuate a seconda della disponibilità di un sistema di monitoraggio. Le classi principali sono la modalità tradizionale, dove non è presente un sistema di monitoraggio, che si divide a sua volta in modalità a fasi fisse e modalità ad attuazione secondo calendario, e la classe di modalità di tipo traffic-responsive, dove è presente un sistema di monitoraggio tramite il quale ottenere i dati e gestire il sistema in tempo reale, che a sua volta comprende l'attuazione a Scenario di traffico e la modalità Adattativa (o anche Adattiva).

### **3.5.1 Modalità tradizionali**

La modalità di controllo tradizionale storicamente utilizzata è la modalità di controllo a fasi fisse; essa consiste nella calibrazione di un piano di controllo successiva all'analisi della domanda di traffico per un certo intervallo temporale medio-lungo. Questa base di dati storici viene tipicamente studiata suddividendo l'analisi secondo giorni tipo, suddivisi a loro volta in fasce orarie principali, definite nella letteratura anglosassone come Time Of the Day (TOD). Si crea pertanto un sistema di controllo attuato a calendario, e non più un sistema con un unico piano fisso. La tipologia di modalità attuata a calendario funziona secondo uno schema che individua gli intervalli critici, ovvero i periodi con flussi di picco, separandoli dalle fasce orarie con flussi definiti di morbida. I flussi di picco sono le fasce orarie della giornata dove il flusso raggiunge i volumi maggiori, mentre si definiscono flussi

di morbida i volumi minori riscontrati. Per ogni fascia oraria principale viene quindi ottenuta la corrispondente domanda di traffico (flusso) dall'analisi dei dati, solitamente nella forma di una matrice origine-destinazione, e si procede con l'elaborazione del piano ottimale. Completata la libreria di Piani, il sistema di gestione delle strategie sarà impostato per attivare in modo automatico il piano corrispondente ad ogni TOD in ogni giorno tipo. La suddivisione più comune dei giorni tipo è ottenuta separando giorni festivi e feriali, e considerando per questi ultimi la distinzione ulteriore per i giorni pre-festivi dai feriali classici.

La seconda distinzione è tra le fasce orarie notturne, dove spesso il sistema in realtà viene disattivato e messo in modalità lampeggiante, e le fasce orarie diurne, dove si hanno gli intervalli critici, completando i TOD con l'individuazione di questi ultimi.

L'efficacia di tale modalità dipende dalla stima e dalle caratteristiche della distribuzione del traffico: per un funzionamento efficace deve verificarsi la condizione per cui il traffico abbia caratteristiche omogenee e distribuzione pressoché costante nella fascia oraria considerata, permettendo la creazione di TOD con una buona corrispondenza alla situazione reale nel giorno tipo considerato.

La modalità con un unico piano a fasi fisse può essere implementata in situazioni dove non ci sia un problema di congestione del traffico, come in piccoli centri urbani, oppure durante le fasce orarie notturne se il sistema semaforico non sia impostato in modalità lampeggiante.

Nello studio *Evaluation of traffic responsive control on the reston Parkway Arterial network, 2009*, Montasir Abbas, Sherif Abdelaziz, si sottolinea come la modalità di attuazione a calendario comporti un investimento modesto dal punto di vista della strumentazione e del sistema di gestione, ma un grande investimento per l'aggiornamento della fonte dati; la variazione nella distribuzione del traffico a lungo termine, se presente, rende obsoleti i piani definiti dopo pochi anni dalla loro calibrazione, richiedendo una nuova analisi della domanda e un nuovo calcolo dei piani di controllo.

Si descrivono a seguire alcune delle logiche e dei sistemi presenti attualmente in commercio.

### **3.5.1.1 Logiche di gestione a tempo fisso per intersezioni non coordinate**

Si possono applicare alle sole condizioni di flusso inferiori alla saturazione, ovvero con flussi che non si avvicinano alla capacità delle arterie confluenti all'intersezione.

Queste strategie sono semplici e si distinguono a seconda dei modelli di ottimizzazione utilizzati. Questi modelli hanno lo scopo di determinare le durate del ciclo e delle fasi ottimali per minimizzare i ritardi e/o massimizzare la capacità; metodi di ottimizzazione utilizzati sono le strategie SIGSET e SIGCAP, che richiedono come dato base il numero di fasi e forniscono il ciclo e le fasi ottimali. Richiedono l'imposizione di alcuni vincoli: verde minimo e massima durata del ciclo.

SIGSET usa la formula di Webster che è una funzione non lineare di ritardo, e computa per una corrente di traffico il valore ideale dei parametri per ridurre il ritardo di tale flusso di traffico. SIGCAP mira a massimizzare la capacità dell'intersezione: questa strategia è utile in condizioni sottosature in una intersezione con flussi molto variabili, per prevenire la condizione di saturazione.[1]

### **3.5.1.2 logiche di gestione a tempo fisso per intersezioni coordinate**

L'implemento della coordinazione è un vantaggio in quanto permette un'analisi completa finalizzata all'ottenimento di strategie di controllo dedicate, potendo ottenere risultati migliori sulla rete studiata in generale.

MAXBAND fu sviluppata da Little considerando il caso semplificato di due arterie con un numero noto di controllori (N), con l'obiettivo di massimizzare il numero di veicoli che attraversano le intersezioni con un sistema di onda verde. È limitato come metodo soprattutto per questo singolo obiettivo: favorisce il deflusso della direzione principale considerando le intersezioni attraversate, ma non le altre direzioni secondarie con i rispettivi flussi. Richiede alcuni vincoli in ingresso, e restituisce le fasi e l'offset calibrati.

TRANSYT fu sviluppato da Robertson ed è una delle strategie di controllo più usate. Il suo primo impiego su strada portò ad un risparmio del 16% del tempo di percorrenza nella rete analizzata. In TRANSYT vanno specificati come dati in ingresso le impostazioni iniziali di fasi e ciclo, verdi minimi e offset. Il ciclo è fissato per l'intera rete in modo da calibrare perfettamente l'offset per la coordinazione. Richiede inoltre tutte le caratteristiche geometriche, i flussi di domanda e le percentuali di svolta per ciascuna intersezione della rete. È limitato ai casi di flusso sotto-saturo. Il metodo è iterativo: calibra tutti i parametri in diverse iterazioni successive, interrompendo le iterazioni quando i valori degli indici di performance migliori sono raggiunti. [1] TRANSYT non prevede un modello per gestire in tempo reale eventi che si verificano sulla rete: incidenti o altri eventi imprevedibili che possono influenzare il traffico in modo improvviso con questo metodo non sono considerati; questa caratteristica in realtà è comune anche ai restanti metodi descritti in precedenza. [1]

### **3.5.2 Modalità traffic-responsive**

Questa tipologia di modalità di gestione richiede un sistema di monitoraggio del traffico e comprende due tipologie, che si differenziano in base alla proprietà di staticità della domanda di traffico.

La principale inefficienza delle modalità tradizionali è la staticità: il traffico non rimane in realtà costante ed omogeneo ma è dinamico, ovvero la distribuzione dei flussi cambia durante il giorno e si modifica nel tempo. Il traffico è dinamico, pertanto, è in continua evoluzione, influenzato da aspetti

economici, sociali e normativi. Non considerare quest'ultima proprietà del traffico veicolare presuppone la necessità di ricalibrare i piani di controllo dopo un certo numero di anni.

La modalità di controllo attuata a scenario di traffico è basata sulla seguente filosofia: essendo il traffico mutevole, il piano di controllo opportuno è attivato quando uno scenario di traffico è individuato. Ciò porta uno sviluppo rispetto alla calendarizzazione ma conserva la proprietà di staticità a lungo termine. Per rispondere in modo efficiente all'evoluzione delle caratteristiche e del trend della distribuzione del traffico negli anni, la libreria di piani di controllo prevista in origine dovrebbe essere tanto ampia da poter rispondere con un piano adeguato a qualsiasi scenario di traffico futuro. Questo limite sottolinea la necessità di una modalità dinamica.

La modalità di controllo adattivo è la modalità dinamica pura: è una diretta conseguenza della modalità attuata a riconoscimento di scenario, per adattare in modo automatico il piano di controllo all'evoluzione del traffico e dei suoi parametri.[1] Il funzionamento di queste modalità è descritto nei capitoli 3.5.2.1 e 3.5.2.2.

Si descrivono a seguire i principali sistemi di controllo presenti in commercio, le logiche che seguono nel loro funzionamento, le principali caratteristiche che li contraddistinguono e le loro principali applicazioni.

### **3.5.2.1 Modalità di controllo attuato da scenari di traffico**

Il funzionamento di questa modalità è il seguente: il piano viene attivato quando lo scenario del traffico sul quale è stato ottimizzato è riconosciuto.

Le metodologie per il riconoscimento dello scenario sono molteplici. La più diffusa è la metodologia a soglia, per la quale vengono osservati uno o più parametri del traffico ed il piano è attivato se si rileva il superamento di tale soglia. Una metodologia più complicata invece può considerare, attraverso un sistema di ponderazione, un indice che rappresenti la "somiglianza": tramite pesi diversi due o più parametri del traffico vengono convertiti in un indice e tale indice è l'obiettivo di un algoritmo di riconoscimento che ha la funzione di scegliere lo scenario principale, presente nella libreria degli scenari, che più si avvicina alla situazione attuale; il piano ad esso attribuito viene pertanto attivato.

Il sistema di controllo ad attuazione per scenario di traffico rilevato è tanto più efficiente quanto il numero di scenari della libreria, e quindi il numero di piani corrispondenti, è ampio.

Tale sistema di controllo è definito nella letteratura come controllo TRPS, ovvero Traffic Responsive Plan Selection, ed è considerato una modalità operativa efficace nei sistemi di segnali di traffico. La sua efficienza deriva dal fatto che è in grado di catturare le variazioni dei modelli di traffico e cambiare i piani di temporizzazione in base alle condizioni di traffico esistenti. (*Evaluation of traffic*

*responsive control on the reston Parkway Arterial network, 2009, Montasir Abbas, Sherif Abdelaziz*) [17]. Ma come detto in precedenza, presenta dei limiti: a lungo termine, se la distribuzione del traffico e dei suoi parametri cambia, può diventare poco efficace. L'attuazione a Scenario è una modalità inclusa per diversi sistemi di Gestione adattativi e pertanto nella tabella XXXX del capitolo 3.5.2.3 è inclusa tale informazione.

### **3.5.2.2 Modalità di controllo adattativo**

Esistono molti sistemi di regolazione adattiva. Questi sistemi includono tra gli altri i sistemi di controllo SCATS, SCOOT e UTOPIA. Sono caratterizzati da un'architettura hardware e una complementare architettura software come i sistemi tradizionali, ma in parallelo utilizzano un sistema di monitoraggio che fornisce le misurazioni con una frequenza molto alta, fornendo continuamente dati per la calibrazione dei parametri del sistema di regolazione. Il sistema centrale elabora le informazioni ottenute da ciascuna delle componenti del sistema di monitoraggio e calcola la strategia ottimale da attuarsi. La strategia, a seconda dell'obiettivo preposto, può consistere nella calibrazione di un ciclo semaforico ottimale coordinato tra successive intersezioni, o un'estensione di una fase specifica per lo smaltimento della coda. Quando il sistema centrale calcola e valuta conveniente una strategia la invia agli elementi su strada, tra i quali controllori e PMV (pannelli a messaggio variabile). Appena i nuovi dati dal sistema di monitoraggio arrivano al sistema centrale, un nuovo calcolo inizia, con un processo che possiamo quindi definire in continuo. La strategia non deve interrompere l'attuale in modo improvviso: se un ciclo ottimale è stato previsto, viene applicato alla fine del ciclo attualmente in corso, se un nuovo migliore piano non è arrivato nel frattempo. Un appropriato sistema di monitoraggio è quindi necessario per avere una rappresentazione continua delle condizioni di deflusso: ciò comporta un'ampia installazione strumentale in ogni sezione stradale di interesse, in particolare in uscita/entrata dall'intersezione, per permettere al sistema di prevedere il modello di coda nell'intersezione a valle; il modello di coda ha quindi la funzione di predire gli arrivi alle intersezioni e quindi costruire la legge di arrivo dei veicoli, in modo da determinare la strategia opportuna per migliorare il deflusso. Alcuni vincoli temporali, sulla durata massima o minima delle fasi e sulla durata del ciclo semaforico totale, devono comunque essere previsti per non sfavorire eccessivamente le correnti di traffico che viaggiano su arterie urbane non principali. [2] Il controllo del traffico con strategia di controllo adattativo riduce i ritardi dei veicoli negli incroci regolamentati in un range del 10-60% rispetto ad un controllo di tipo tradizionale. [2]

#### **3.5.2.2.1 Logiche di gestione di tipo responsive senza coordinazione tra intersezioni**

La filosofia che adottano è la seguente: se durante il verde minimo non passano veicoli, il sistema è in grado di rilevare tale condizione e la fase successiva viene attivata; altrimenti per un flusso continuo

viene creato un intervallo critico con prolungamento del tempo di verde, rispettando il vincolo di massima durata della fase. Ogni pochi secondi (a seconda delle impostazioni scelte) il sistema interroga i rilevatori per aggiornare la situazione in tempo reale e opera la scelta tra il cambio di fase e il prolungamento dell'attuale fase in corso. [1]

Nel caso una sequenza di verde si prolunghi e sia raggiunta la massima durata del verde posta come vincolo, il cambio fase viene forzato e si formerà un fenomeno di coda alla linea di arresto. Per migliorare la legge di attuazione in realtà diversi sistemi considerano la condizione delle arterie con flusso secondario rispetto alla direzione principale, per non prolungare il tempo di rosso eccessivamente. Il tempo di rosso è spesso calibrato con modelli comportamentali, che stimano quale sia il massimo tempo di attesa che l'utenza può subire senza raggiungere un livello di disagio eccessivo.[1]

I concetti espressi in precedenza si traducono in algoritmi più o meno sofisticati.

MOVA è un sistema sviluppato da Miller, con un algoritmo a cui il sistema risponde ciclicamente: ogni T secondi, dove T è un intervallo fissato, il sistema viene interrogato per capire se il cambio di fase è conveniente o deve essere rimandato di un intervallo T. Per ottemperare questa decisione, la strategia calcola in modo semplificato l'impatto che avrebbe il cambio fase rispetto all'impatto che avrebbe il rinvio di tale decisione. Se conviene effettuare il cambio fase, la fase è cambiata, altrimenti la decisione è rimandata e lo stesso calcolo si effettua al tempo T successivo. [1] La coordinazione tra intersezioni non è considerata e ciò costituisce un forte limite nel raggiungimento di adeguate prestazioni.

#### **3.5.2.2.2 Logiche di gestione di tipo responsive con coordinazione tra intersezioni**

Differiscono rispetto ai precedenti perché considerano la coordinazione tra intersezioni. SCOOT fu la prima di questo tipo. Sviluppata da Robertson, è considerata la versione responsive di TRANSYT, ed è stata usata in più di 150 città. Utilizza i dati di occupazione e volume, rilevati a monte dell'intersezione, della corrente di traffico. In un sistema centrale è implementata una filosofia simile a TRANSYT (iterativa), ma con dati reali, e viene calcolato in tempo reale l'insieme di impatti ed effetti che il cambio di offset, fasi, durata del ciclo e split portano. Se la nuova soluzione apporta benefici, viene applicata, mandandola dal centro di controllo ai singoli controllori. [1] Le prestazioni di SCOOT peggiorano in caso di sovrasaturazione.

Un gruppo di strategie responsive e coordinate, tra loro simili, sono OPAC, PRODYN, CRONOS e RHODES. Queste strategie non considerano esplicitamente split, offset o cicli. Sulla base di fasi prestabilite, calcolano in tempo reale i valori ottimali dei prossimi tempi di commutazione della fase per un orizzonte temporale futuro, a partire dal tempo corrente e dalla fase attualmente applicata.

Sono procedure che considerano un orizzonte temporale mobile con un continuo ricalcolo. Tipicamente il target di queste strategie è minimizzare il tempo totale speso da tutti i veicoli sulla rete. Il problema di queste strategie è che la complessità dell'algoritmo di calcolo e il conseguente tempo computazionale non permettono un loro uso in tempo reale, ovvero in modalità responsive, per più di una intersezione, perdendo di fatto il concetto di coordinazione. L'unica che nei suoi recenti aggiornamenti ha superato questo limite è CRONOS, che invece di utilizzare una funzione di tipo esponenziale è passata ad usare una polinomiale, rendendo possibile considerare più intersezioni perché più efficiente secondo l'aspetto computazionale. [1]

Un ulteriore approccio è quello delle strategie Store-and-Forward, che introducono una semplificazione di modello tale da descrivere sinteticamente la matematica del flusso, permettendo lo studio di larghe porzioni di rete al contempo. [1]

I più diffusi sistemi per la gestione del traffico in modalità traffic-responsive sono SCOOT, SCATS, INSYNC e UTOPIA, che vengono perciò analizzati nel dettaglio nei capitoli seguenti

#### **3.5.2.2.2.1 SCATS**

Al principio implementato e sviluppato a Sydney, Australia, e poi adattato ed installato in altri scenari internazionali. I dati vengono trasmessi tramite il controllore del traffico ad un calcolatore centrale, che apporta modifiche incrementali al traffico calibrate sui dati che arrivano minuto per minuto. Seguendo l'evoluzione del traffico con un intervallo tra misurazioni successive breve e ad ogni intersezione, sia la proprietà di coordinazione che quella di dinamicità sono soddisfatte.

Questo sistema di controllo del traffico adattivo è efficace nel minimizzare il numero di fermate, minimizzare i ritardi e diminuire il tempo di percorrenza, selezionando opportunamente la lunghezza del ciclo e fornendo le fasi semaforiche adattate alle diverse correnti di traffico.

La filosofia di SCATS può essere riassunta secondo i seguenti step [11]:

1. misura e quantifica il volume di traffico in movimento;
2. converte i dati in flusso di traffico;
3. calcola la lunghezza del ciclo opportuna;
4. calcola la migliore suddivisione tra le fasi;
5. determina la combinazione tra le fasi;

Alcuni casi studio sul campo, come Mashhad (Iran), hanno evidenziato la resilienza del sistema SCATS nei confronti del trend (crescente) del flusso di traffico in periodi lunghi. [11]

Sono altresì stati evidenziati alcuni punti deboli del sistema SCATS: il cambio di piano non avviene automaticamente ma successivamente ad un comando mandato dal personale che controlla il sistema,



aumentando i costi in termini temporali per riconoscere, reagire e mandare il comando, creando un ritardo tra azione e reazione, e un costo diretto conseguente alla necessità di personale. [11]

La struttura del sistema inoltre non è efficace: ogni intersezione è valutata come sottosistema e non è automatica la gestione integrata dei sottosistemi, perdendo la coordinazione. [11]

I benefici e buoni risultati rilevati sono:

- Snellezza nella struttura (architettura);
- Buona reattività alla congestione del traffico derivante da incidenti e anomalie;
- Supporta la priorità ai mezzi pubblici di emergenza
- Grande capacità di gestire cambiamenti imprevedibili del volume di traffico. Capacità di fornire una risposta dinamica alla domanda di traffico, anche se quest'ultima sia estremamente variabile;
- Reattività alle fluttuazioni quotidiane e a lungo termine;
- Sistema di allarme in caso di malfunzionamenti della strumentazione;
- Nessuna necessità di ricalcolo o calibrazione periodica;
- Efficace nella riduzione di incidenti, emissioni, inquinamento e ritardi nella rete;

#### **3.5.2.2.2 SCOOT**

La strategia denominata Split Cycle Offset Optimization Technique è un sistema di controllo di tipo adattativo sviluppato in UK e applicato sul campo per la prima volta a Glasgow negli anni Settanta. [11]

È un sistema adattativo di controllo del traffico, che raccoglie dati e informazioni dai rilevatori (sensori e strumenti) ed elabora queste informazioni per ottimizzare le intersezioni semaforizzate, calibrando le fasi e i cicli con l'obiettivo di ridurre il numero di fermate e di ridurre i ritardi. [11]

La filosofia base di SCOOT è quella di fornire risposte veloci ai cambiamenti del volume di traffico. Questo avviene con una elaborazione delle informazioni da ciclo a ciclo, in modo da seguire la variazione dinamica del traffico. La risposta è veloce, ma non tale da rendere il sistema instabile.

SCOOT può rilevare se improvvisi e temporanei cambiamenti del traffico di domanda siano casi particolari, come cambiamenti repentini ma molto brevi della domanda o anomalie, ed evitare l'adattamento per tali casi. È quindi resiliente nei confronti di anomalie o errori nel reperimento dei dati, ed è in grado di ignorarli e non adattare i parametri dei controllori per questi casi. [11]

Le capacità di SCOOT sono molteplici, compresa la possibilità di considerare la priorità al trasporto pubblico, attuata tracciando lo stesso mezzo in modo da prevedere ed includere la fase dedicata solo con il veicolo in prossimità dell'intersezione (possibile implementazione di strumenti AVL = automatic vehicle location). [11]

Le prestazioni e caratteristiche di SCOOT si possono riassumere nelle seguenti:

- efficacia nella gestione della congestione;
- massimizzazione dell'efficienza della rete;
- struttura di comunicazione flessibile;
- priorità al trasporto pubblico;
- individuazione degli incidenti e dei malfunzionamenti;
- stima e quantificazione delle emissioni;
- informazioni complete ed integrate sul traffico;

Sono stati individuati alcuni punti deboli: per sezioni molto corte l'accumulo della coda, se la fase di rosso diviene importante, può causare un problema di reperimento delle misure oscurando i rilevatori utili. SCOOT in tal caso non riesce a calibrare in modo corretto le sezioni critiche. SCOOT come sistema di controllo necessita di una grande base strumentale installata e di adeguata manutenzione della stessa. [11]I benefici rispetto ai sistemi di controllo a tempo fisso sono evidenti nonostante i limiti riscontrati.

L'efficacia e l'affidabilità di SCOOT sono state testate in 9 città. Secondo le evidenze sperimentali SCOOT dovrebbe ottenere una riduzione supplementare del 3% del ritardo per ogni anno di durata di un piano a tempo fisso prima che si effettui la sua ricalibrazione. Si è stimato che ricalibrandosi in automatico, con il passare degli anni il sistema SCOOT faccia risparmiare il 20 % del ritardo totale che verrebbe accumulato con un sistema di controllo a piano fisso tradizionale. Applicandolo nella città di Toronto, si è osservata una riduzione del tempo di viaggio dell'8 %, una riduzione del 17 % del ritardo nei giorni feriali e del 31 % nei giorni festivi. [11]

In conclusione, si può affermare che SCOOT è una versione ottimizzata di SCATS, con un costo di installazione leggermente maggiore di SCATS, ma con notevoli vantaggi nella computazione: SCOOT non si avvale di un computer centrale ma può essere implementato direttamente presso i controllori. [11]

### **3.5.2.2.3 INSYNC**

Il sistema di controllo del traffico adattivo Insync è un sistema di trasporto intelligente sviluppato nel 2005 e nel 2009 applicato a più di 900 intersezioni negli Stati Uniti. [11]

Insync è un sistema plug-and-play, che funziona con cabine e controllori di traffico esistenti. I suoi due componenti hardware principali sono videocamere IP e un processore. [11]

Nato in origine per supportare un sistema di monitoraggio RADAR, è stato successivamente adattato per l'utilizzo di altri sensori per motivi per lo più economici dato l'elevato costo dei sistemi RADAR. Le videocamere in particolare sono uno dei sistemi più utilizzati: determinano il numero di veicoli e

quanto tempo i veicoli sono stati in attesa (ritardo). Il processore, situato presso l'armadietto di controllo all'intersezione, elabora i dati in tempo reale e richiama il piano adatto, potendo coordinarsi con altre intersezioni vicine. [11]

Per ottimizzare in modo locale, Insync utilizza sensori digitali integrati per conoscere il numero di auto che attendono in un incrocio e per stimare il ritardo, e seguire la seguente logica di funzionamento: la priorità è fornita calibrando la fase secondo la coda formatasi e secondo i valori di ritardo osservati. La suddivisione delle fasi e dei verdi è dinamica e in mutamento continuo, permettendo di avere un utilizzo del verde efficiente. Si possono, essendo coordinabili più intersezioni, creare strategie di onda verde per fornire la priorità ad una direzione specifica del traffico, diminuendo notevolmente il tempo di viaggio.

L'offset tra le fasi di intersezioni successive è ottimizzato attraverso le condizioni di traffico in tempo reale, quindi calibrando durata e frequenza delle fasi di verde in ogni intersezione. [11]

I punti deboli evidenziati dai sistemi Insync installati sono:

- Dipendenza dai rilevatori di traffico e dai sensori per il reperimento dei dati: computando in tempo reale richiede una base dati da processare continua, e per guasti agli strumenti il sistema si può paralizzare;
- in caso di sovrasaturazione Insync non è in grado di risolvere la sovrasaturazione stessa;
- non avendo un calcolatore centrale, può gestire solo su un numero limitato di intersezioni coordinate;

Benefici di Insync sono la dinamicità e la considerazione del contesto: considera la condizione a monte e a valle dell'intersezione, rendendo possibile la descrizione dell'evoluzione delle condizioni di traffico e consentendo di prevedere scenari futuri (orizzonti futuri brevi). Quest'ultima è una differenza sostanziale rispetto ad altri sistemi di gestione del traffico.

Rispetto a quasi tutti i sistemi di controllo del traffico che utilizzano un hardware digitale, ma sono limitati da elaborazione analogica, ad esempio, per la lunghezza del ciclo, fase, offset e suddivisioni delle fasi, il processore Insync è un automa: è cioè un modello di calcolo che può scegliere dinamicamente quali fasi servono ed istantaneamente regolarle, così come può regolare il servizio di coordinamento e il tempo di verde. [11]

Adattandosi alla domanda effettiva di traffico, Insync è superiore ai sistemi a selezione di piano che, nel migliore dei casi, stimano la domanda di traffico sulla base di un campione di dati storici e lo generalizzano, utilizzandolo per anni. La capacità di Insync di analizzare costantemente e di servire in modo flessibile la domanda reale è ciò che gli permette di produrre risultati sorprendenti se confrontati con quelli dei sistemi anteriori il suo utilizzo. [11]

#### 3.5.2.2.2.4 UTOPIA

FIAT Research Centre, ITAL TEL e MIZAR Automation hanno sviluppato e progettato UTOPIA (Urban Traffic Optimization by Integrated Automation) e SPOT (Sistema per Priorità e Ottimizzazione del Traffico) a Torino con l'obiettivo principale (iniziale) di migliorare il trasporto privato.

Una grande differenza tra questo sistema di controllo del traffico adattivo e quello precedente (Insync) è il miglioramento dell'efficienza del trasporto pubblico, che il sistema americano non considera. Circa quaranta incroci segnalati nell'area centrale di Torino hanno costituito la prima rete UTOPIA dal 1985. In tale rete fu compresa una linea tranviaria che, dopo l'applicazione di UTOPIA-SPOT, venne controllata implementando la gestione del trasporto pubblico per allinearla al resto dei sistemi in uso. Italia, Paesi Bassi, Finlandia, Norvegia, USA e Danimarca sono altre realtà in cui UTOPIA-SPOT è implementato attualmente.

Questa architettura è costituita da un livello superiore (sistema centrale), che è responsabile per la definizione delle strategie di controllo globale, e un livello inferiore (intersezioni controllate) in cui il controllo del semaforo è implementato tramite il software SPOT.

L'applicazione principale di UTOPIA a Torino è il Progetto 5T: nel 1992 è stato sviluppato questo progetto su larga scala di mobilità telematica denominato 5T (Telematics Technologies for Transport and Traffic di Torino). 5T progetta, sviluppa e gestisce le soluzioni ITS migliorando la mobilità individuale e collettiva su scala regionale. Gli obiettivi del progetto 5T erano i seguenti:

1. Migliorare i flussi di traffico e la sicurezza.
2. Riduzione dell'inquinamento ambientale causato dal traffico.
3. Migliorare l'efficienza e la qualità dei trasporti pubblici.
4. Fornire servizi di informazione in tempo reale ai viaggiatori.
5. Sviluppo di un sistema strategico di vigilanza per tutti i sottosistemi telematici dei trasporti.
6. Estensione delle strutture esistenti di controllo del traffico urbano e priorità degli autobus su un'area più ampia della rete urbana.
7. Estensione delle funzioni del sistema di gestione dei trasporti pubblici per includere le informazioni degli utenti e il conteggio dei passeggeri. .
8. Sviluppo di un sistema per informare meglio i cittadini sui servizi di mobilità.
9. Integrazione funzionale dei sistemi di controllo del traffico con il sistema di monitoraggio e previsione ambientale

Per ottemperare ai predetti obiettivi, Utopia-Spot è stato installato sulla rete. I risultati osservati a Torino (IT) costituiscono uno dei casi studio più affidabili in cui è stato installato il sistema di controllo del traffico adattivo UTOPIA. Dopo aver applicato questo sistema a più della metà delle

intersezioni di Torino e averne analizzato i risultati, UTOPIA è stata raccomandata come migliore scelta rispetto alle alternative dell'epoca presenti in commercio.

Nonostante le ottime prestazioni, alcuni punti deboli di UTOPIA sono stati osservati nei tempi di attesa più lunghi per i veicoli a causa della priorità e della prevenzione accordata ai trasporti pubblici. La causa principale dei ritardi, delle incomprensioni, della scarsa partecipazione di alcune parti può essere individuata nell'errata interpretazione delle esigenze degli utenti e nella sottovalutazione del livello di accordo necessario per raggiungere gli obiettivi; la componente comportamentale e di percezione dell'utente spesso può invalidare le assunzioni fatte a livello progettuale.

I maggiori benefici individuati dopo aver esaminato i risultati del progetto 5T e di analoghi sistemi telematici per la mobilità, sviluppati e sperimentati nell'ambito dei contratti di ricerca dell'UE, sono stati tradotti in alcune linee guida. Lo spostamento della mobilità verso il trasporto pubblico risulta essere un aspetto cardine nella gestione del traffico. Risulta infatti necessario in tutte le città europee con traffico intenso aumentare la capacità in termini di utenti, diminuendo i mezzi che creano la congestione. Ciò può essere incoraggiato sia dallo sviluppo della telematica nella mobilità, sia migliorando le prestazioni del trasporto pubblico e aumentando la percezione del cittadino nei confronti di questo miglioramento; i sistemi di gestione telematica che sono in grado di eseguire una regolazione dinamica e sensibile al traffico sono potenti strumenti per ridurre la congestione e l'inquinamento, migliorando al contempo la convenienza per i viaggiatori. I viaggiatori dovrebbero pertanto avere accesso alle informazioni necessarie ad una corretta percezione del guadagno che avrebbero dall'uso di suddetti mezzi di trasporto. Tali informazioni, rese disponibili dalla telematica sulla mobilità, permetterebbero la corretta percezione della qualità e potenzialità del trasporto pubblico.

UTOPIA nel progetto 5T ha evidenziato buona integrità di sistema, buona gestione della priorità ai trasporti pubblici e un'ottima riduzione, nei confronti di altri sistemi, dei tempi di viaggio e dei ritardi del trasporto veicolare privato attuando la coordinazione tra le intersezioni.

#### **3.5.2.2.4.1 Architettura e funzionamento di UTOPIA**

Utopia è un sistema di controllo del traffico progettato per migliorare le condizioni di spostamento urbano mediante l'applicazione di principi di controllo completamente automatizzati. Inizialmente dedicato solo per applicazioni di gestione in modalità adattativa, in realtà supporta anche i metodi a selezione di piano e a fasi fisse (figura 1).



*figura 1 Modalità di funzionamento del sistema Utopia*

Le strategie di controllo di UTOPIA mirano a ridurre significativamente il ritardo dei veicoli privati durante i viaggi all'interno dell'area controllata, a condizione che i veicoli pubblici che richiedono la priorità non siano fermati alle intersezioni semaforizzate. Si crea infatti una gerarchia delle chiamate alle unità SPOT che privilegia le linee del trasporto pubblico, essendo la frequenza di passaggio minore e l'impatto del ritardo maggiore per gli utenti a bordo.

Il funzionamento di UTOPIA è di creare un sistema per effettuare un'ottimizzazione in tempo reale delle fasi semaforiche del segnale, al fine di minimizzare il costo socio-economico totale del sistema "traffico". Le strategie di controllo sono calcolate in tempo reale considerando l'attuale stato del traffico agli incroci, i conteggi, le previsioni di domanda a livello di intersezione e di area, e i tempi di arrivo previsti per il trasporto pubblico prioritario e i veicoli d'emergenza.

Dove UTOPIA è usato in modalità adattativa, per controllare le intersezioni su un corridoio o una griglia di intersezioni adiacenti, i rilevatori all'uscita di ogni intersezione a monte diventano i rilevatori in entrata per l'intersezione a valle. In questo caso, le informazioni del rivelatore vengono distribuite automaticamente sulla rete di comunicazione e non è necessario disporre di sezioni di misurazione intermedie.

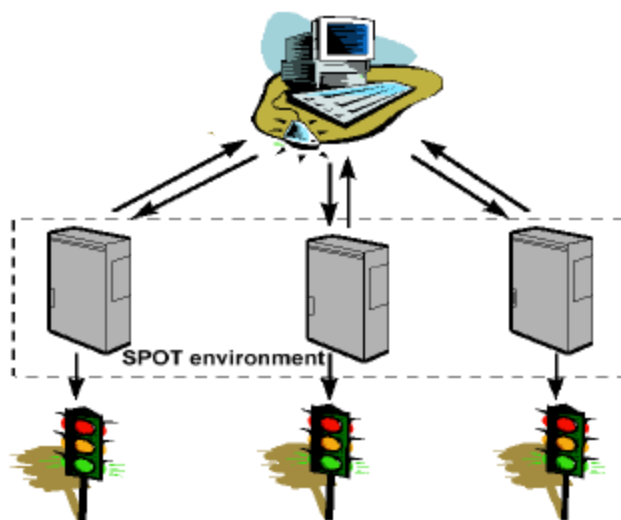
Dal punto di vista funzionale, l'architettura UTOPIA è gerarchica e distribuita: le strategie di controllo ottimali sono determinate al livello più alto (area), mentre il controllo dei semafori è attivato al livello più basso (intersezione). Il livello superiore (area) coordina le unità di controllo di intersezione fornendo loro criteri di ottimizzazione e strategie di controllo di riferimento. Ogni intersezione è quindi controllata in modo indipendente in base alle condizioni di traffico effettive incontrate agli incroci, ma l'ottimizzazione locale viene eseguita secondo gli obiettivi globali. Sia a livello centrale che a livello di intersezione le strategie sono calcolate secondo un orizzonte temporale aggiornato continuamente (rolling horizon). A livello di area l'ottimizzazione viene eseguita su un orizzonte di 30 minuti e ripetuta ogni 5 minuti; a livello di intersezione l'orizzonte temporale è pari a 2 minuti e l'ottimizzazione viene ripetuta ogni 3 secondi. L'ottimizzazione è fatta attraverso l'interazione di

diverse componenti: modelli di coda dinamicamente aggiornati, richieste di fase (chiamate) ponderate con diversi pesi, vincoli sulla massima e minima durata di fase. Nei sistemi in cui UTOPIA lavora in collaborazione con altre applicazioni ITS (Intelligent Transport system), il livello superiore (area) può essere interfacciato alla piattaforma OMNIA per offrire uno strumento di gestione che mostri tutte le funzionalità e gli oggetti presenti. Attraverso questa piattaforma si può fornire agli operatori della pubblica amministrazione il controllo sul sistema: si possono controllare telecamere, sensori, misurazioni in tempo reale, e di conseguenza scegliere strategie dedicate. In modalità traffic-responsive, queste strategie possono essere attivate in automatico.

Nel sistema UTOPIA l'intelligenza locale è molto importante. Il software che esegue le funzioni di controllo nell'unità locale si chiama SPOT. In generale, il nome UTOPIA è utilizzato per identificare in modo univoco tutti i moduli/funzioni software che operano a livello centrale. SPOT è uno speciale programma che opera su una CPU separata, collegata al controllore di traffico. Installato in ogni intersezione controllata, il software SPOT scambia continuamente informazioni:

- con le unità adiacenti per cooperare nella definizione della strategia di controllo locale e per attuare un coordinamento dinamico adatto sia al traffico privato che alla gestione prioritaria dei trasporti;
- con il livello superiore (area) per ricevere comandi, richieste di priorità e strategie di controllo di riferimento (raccomandate/calcolate a livello di area) e per fornire parametri di traffico, strategie da attuare e informazioni diagnostiche.

In figura 2 è schematizzata la composizione dell'architettura di Utopia.



*figura 2 Architettura di Utopia*

La seguente immagine (figura 3) riassume il ciclo di funzionamento di Utopia.

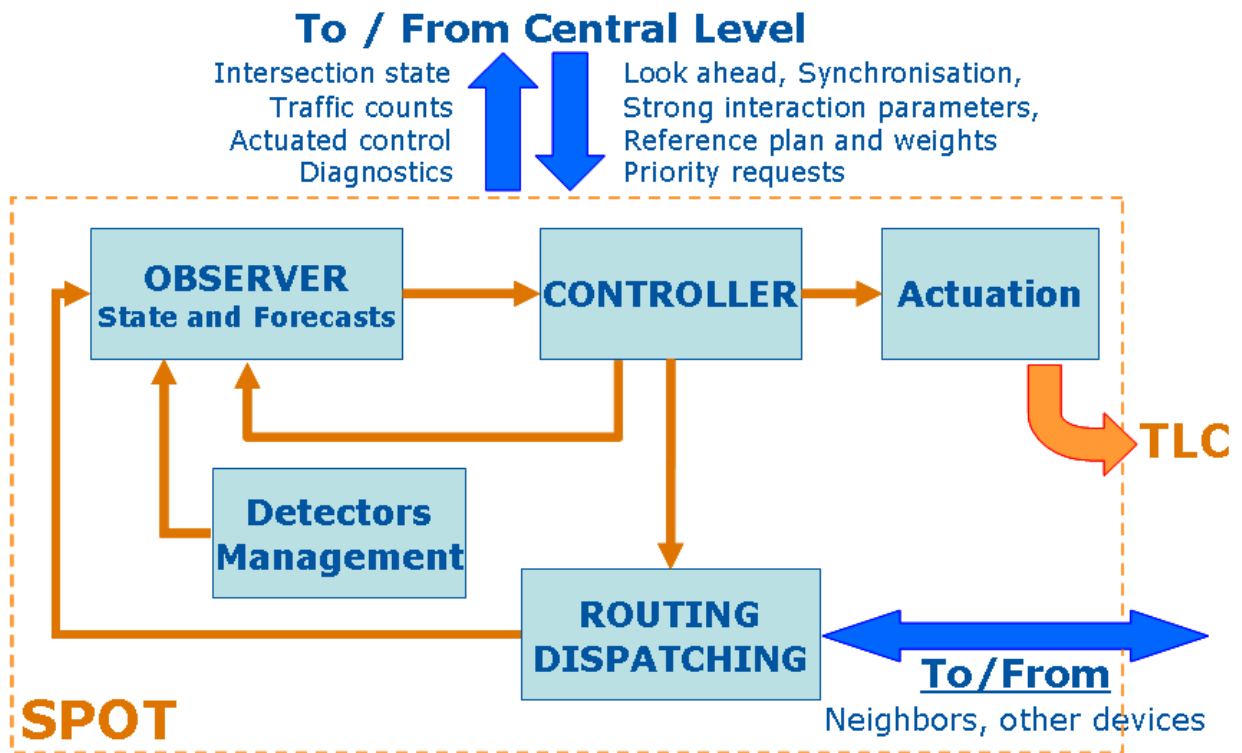


figura 3 Ciclo di funzionamento di Utopia



### 3.5.2.3 Confronto e analisi dei sistemi di gestione adattivi

Ogni sistema di gestione del traffico ha caratteristiche uniche che rendono difficile un confronto. Per poterlo effettuare sono stati analizzati gli aspetti e le caratteristiche principali di questi sistemi attribuendo un sistema di ponderazione che rappresenti l'attitudine di ognuno a soddisfare i principali requisiti. Si consideri inoltre che i precedenti sistemi di controllo analizzati non costituiscono la totalità dei sistemi di controllo in commercio, ma soltanto i più utilizzati. È omessa la proprietà di dinamicità che accomuna tutti e quattro i sistemi essendo di tipo adattativo.

Il confronto ha considerato le seguenti proprietà e le corrispondenti categorie riportate.

- Copertura in termini di dimensione della rete massima: limitata, media, ampia;
- grado di coordinazione tra intersezioni secondo il numero delle stesse supportato: nullo, basso, medio, buono;
- Costo di installazione: basso, medio, alto;
- Tipologia di architettura: centrale, locale o entrambe;
- Risultati attesi (dedotti da Studi in letteratura [11]): discreti, buoni, ottimi;

La seguente tabella riassume le proprietà dei sistemi considerati.

	<b>copertura</b>	<b>grado di coordinazione</b>	<b>architettura</b>	<b>costo</b>	<b>risultati attesi</b>
<b>SCATS</b>	ampia	basso	entrambe	basso	buoni
<b>SCOOT</b>	media	medio	locale	medio	buoni
<b>INSYNC</b>	limitata	medio	locale	alto	ottimi
<b>UTOPIA</b>	media	buono	entrambe	medio	buoni

*Tabella 1 Confronto tra principali Sistemi di gestione del traffico*

Per le dimensioni limitate della rete, la considerazione della coordinazione per un buon numero di intersezioni e la disponibilità del software presso l'azienda Swarco Mizar, che risulta essere lo sviluppatore stesso di tale programma, le analisi relativi al caso studio di Porta Maggiore sono proseguite utilizzando UTOPIA come sistema di Gestione e Controllo del traffico.

#### 4 Caso studio: incrocio di Porta Maggiore

Il nodo di Roma Porta Maggiore è situato a Sud-Est della stazione ferroviaria di Roma Termini. Tale nodo è costituito da due intersezioni semaforizzate, Piazzale Labicano a Sud-Est e Piazza di Porta Maggiore a Nord-Ovest (figure 4 e 5).



figura 4 Nodo di porta Maggiore, Roma, Google Maps



figura 5 intersezioni componenti il nodo di Porta Maggiore

Ciascuna delle due intersezioni è dotata di un sistema di controllo semaforico locale con fasi a tempo fisso. In entrambi, il sistema di controllo adattivo Utopia-Spot è configurato, ma non è abilitato per l'ottimizzazione ed è quindi mantenuto in modalità di controllo locale a piano fisso.

Nel nodo convergono sette arterie urbane. Presso Piazzale Labicano vi è l'accesso di Via Casilina e di Via Prenestina. Nella zona Nord, presso piazza di Porta Maggiore, vi sono gli accessi di Via dello Scalo San Lorenzo, Via Giolitti, Via di Porta Maggiore e a Sud-Ovest l'uscita presso Via Statilia e via Eleniana. In (figura 6) sono evidenziate i sensi di percorrenza in entrata (rosso) ed in uscita (blu) per ciascuna delle strade citate. Via Giolitti e Via Statilia sono percorribili con senso unico in uscita dal nodo.



*figura 6 flussi veicolari nel nodo di Porta Maggiore*

I veicoli entrano nel nodo da cinque accessi, tuttavia solo alcuni di essi presentano un flusso rilevante. Via di Porta Maggiore ha origine presso la zona a traffico limitato di Piazza Vittorio Emanuele II, pertanto il flusso veicolare è modesto. Le quattro strade rimanenti sono caratterizzate da traffico notevole durante le ore di punta, con diverse distribuzioni tra picco mattutino e pomeridiano, che sono analizzate nel paragrafo “domanda di mobilità”.

I sistemi di monitoraggio presenti, ovvero l'insieme degli strumenti attivi e necessari per l'analisi, sono configurati in Utopia e sono visibili attraverso la piattaforma Omnia. Le intersezioni con sensoristica e controllo semaforico attive sono visualizzate attraverso un segnale di colore verde. La

seguinte figura 7 mostra le attuali intersezioni con sistemi monitorati presenti nell'area oggetto di studio e nelle aree urbane limitrofe.



*figura 7 intersezioni configurate in Omnia-Utopia*

Numerate da Ovest verso Est, le quattro intersezioni con gestione semaforica e strumentazione configurata in Utopia sono:

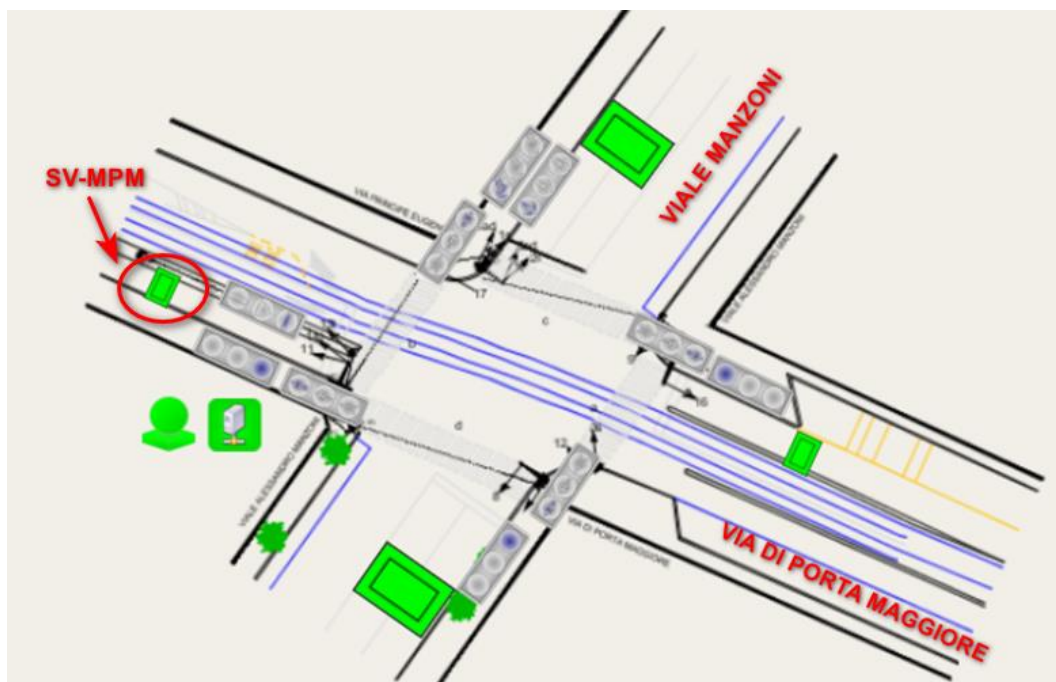
1. Intersezione di Via di Porta Maggiore con Viale Manzoni.
2. Piazza di Porta Maggiore.
3. Piazzale Labicano.
4. Via Prenestina-Deposito ATAC.

Quest'ultima in realtà non ha alcuna sensoristica attiva. Le restanti intersezioni sono analizzate a seguire in paragrafi dedicati. L'intersezione di Via Prenestina- Deposito Atac sarà considerata solo per includere nell'espansione del modello V3 suddetta intersezione, in modo che i flussi in arrivo al Piazzale Labicano siano generati da un'intersezione semaforizzata. Verrà per lo stesso motivo presa in considerazione anche l'intersezione di Piazza di Santa Croce in Gerusalemme-Via Eleniana, che viene indicata nell'immagine precedente con un cerchio di colore blu, distinguendola dalle precedenti essendo sprovvista della configurazione Utopia (di conseguenza non visibile tramite la piattaforma Omnia).

#### **4.1.1.1 Intersezione di Via di Porta Maggiore-Viale Manzoni**

La presente intersezione non è interessante dal punto di vista della gestione del controllo semaforico, ma è importante per la calibrazione della domanda veicolare in ingresso al nodo, in quanto si tratta di un'intersezione a monte di Piazza di Porta Maggiore. La strumentazione presente è purtroppo

insufficiente per dedurre il flusso che ha come destinazione il nodo di Piazza di Porta Maggiore, non risultando sufficiente alla definizione delle percentuali di svolta che da Viale Manzoni convergono su Via di Porta Maggiore. (figura 4)

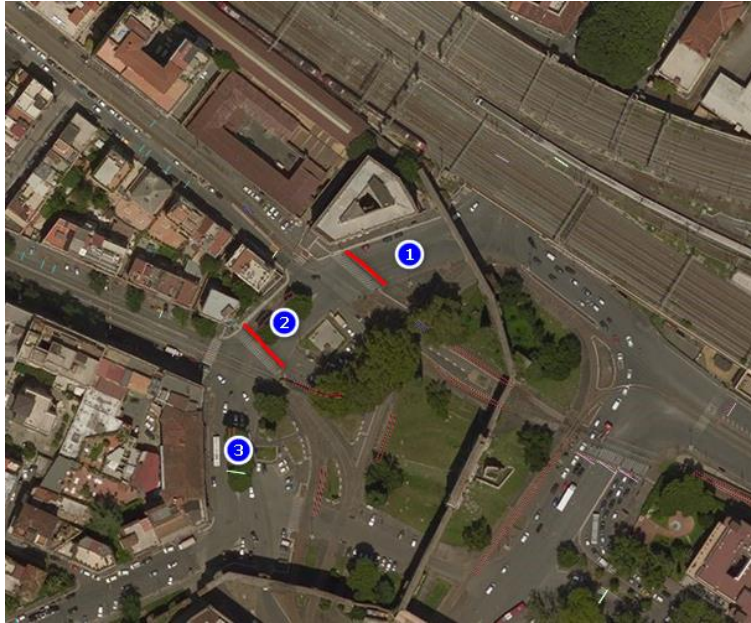


*figura 8 strumenti di misura, intersezione Viale Manzoni-Via di Porta Maggiore*

Roma Servizi per la Mobilità stima, da indagini effettuate sul campo, che il flusso rilevato a monte su Via di Porta Maggiore si preservi a valle, ovvero che il numero di veicoli che svoltano in Viale Manzoni e che da esso svoltano nella via di interesse sia di portata simile. Seguendo tale indicazione, la valutazione dei conteggi nel capitolo “Domanda di mobilità” prende in considerazione la spira presente a monte dell’intersezione, evidenziata nell’immagine precedente come SV-MPM (Spira Virtuale-Manzoni Porta Maggiore).

#### **4.1.1.2 Piazza di Porta Maggiore**

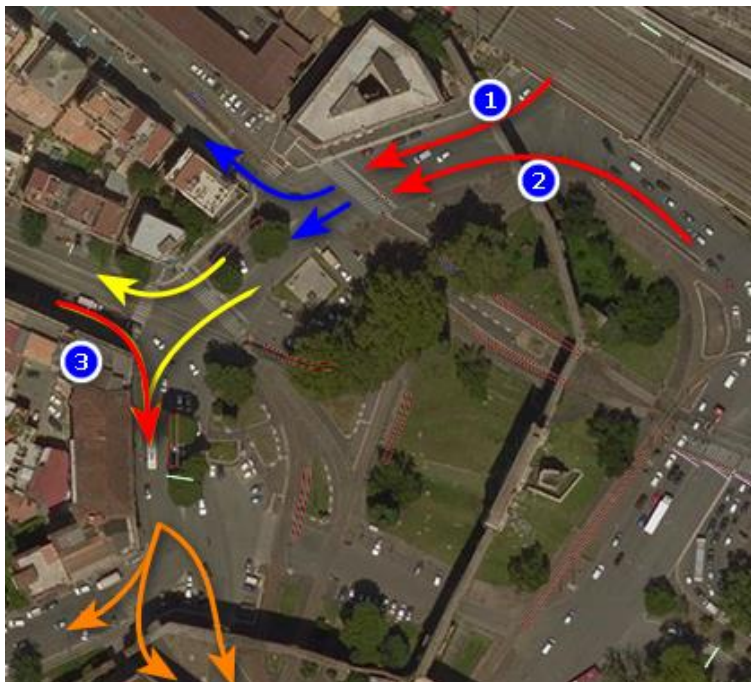
Piazza di Porta Maggiore è caratterizzata da flussi notevoli, provenienti da Via dello Scalo San Lorenzo e da Piazzale Labicano, e da un flusso minore ma comunque importante proveniente da Via di Porta Maggiore. La Piazza può essere descritta come l’insieme di tre zone, separate da due sezioni con linea di arresto e gestite da un sistema di controllo semaforico con fasi coordinate tra loro. Lo schema è rappresentato in figura 9.



*figura 9 intersezione Piazza di Porta Maggiore, particolare sulle sezioni semaforizzate*

Le correnti veicolari entranti nelle varie sezioni sono rappresentate nello schema seguente, figura 10, con il colore rosso. A completamento dello schema sono inserite le ulteriori manovre che caratterizzano il deflusso nell'intersezione. Sono state enumerate le correnti in ingresso:

1. Flusso proveniente da Via dello Scalo San Lorenzo.
2. Flusso proveniente da Piazzale Labicano.
3. Flusso proveniente da Via di Porta Maggiore.



*figura 10 intersezione Piazza di Porta Maggiore, particolare sui flussi veicolari. (rossi flussi in entrata)*

La configurazione dei segnali e della strumentazione in Utopia, osservabile tramite Omnia, evidenzia come in realtà sia completamente assente qualsiasi tipo di sensore (figura 11).

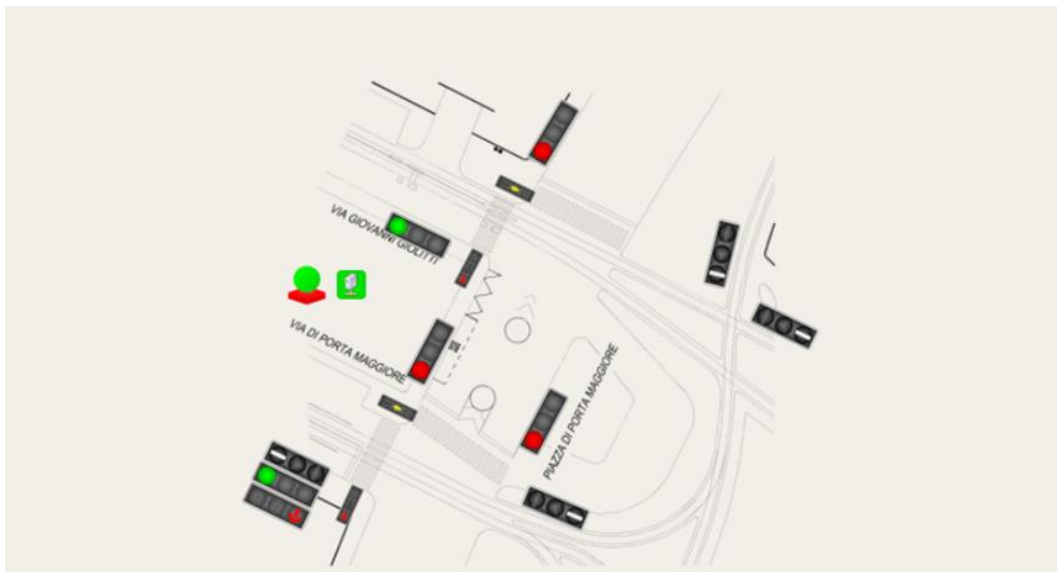


figura 11 dettaglio di incrocio (Omnia), Piazza di Porta Maggiore

I segnali semaforici e le fasi attualmente attive sono rappresentati nel seguente diagramma delle fasi (figura 12). La durata del ciclo è di 153 secondi e non sono stati considerati i segnali pedonali che nella successiva tabella 2 vengono invece riportati.

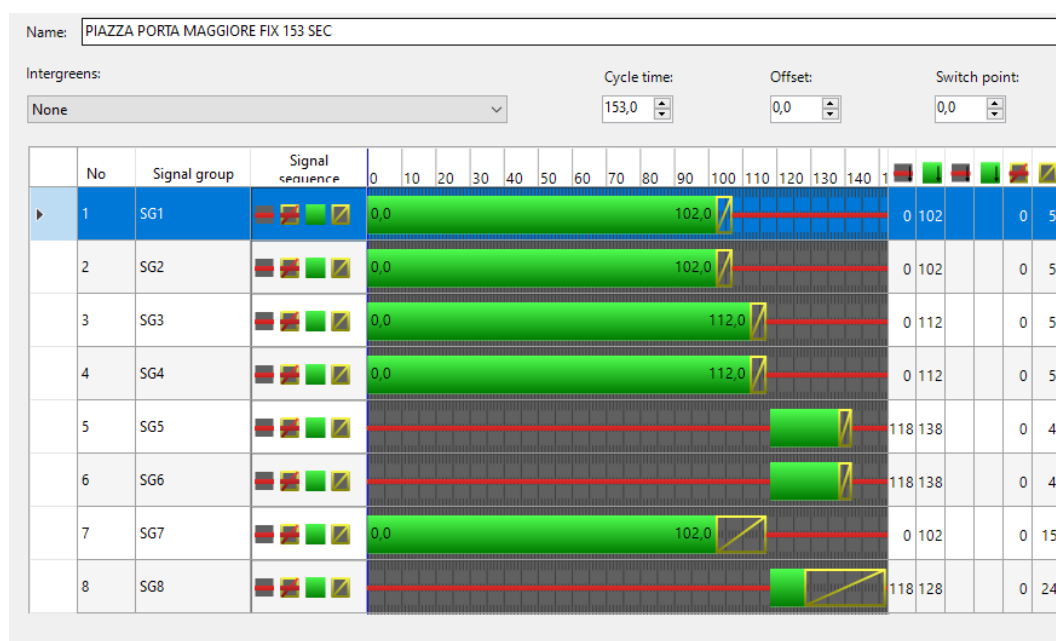


figura 12 piano semaforico originale, Piazza di Porta Maggiore

Nella seguente tabella è riportata l'associazione tra i codici delle lanterne e i gruppi segnale presenti in Utopia con i corrispondenti sul modello Vissim. È riportata l'indicazione riguardante la tipologia di veicoli che caratterizza il flusso servito da ciascun segnale.

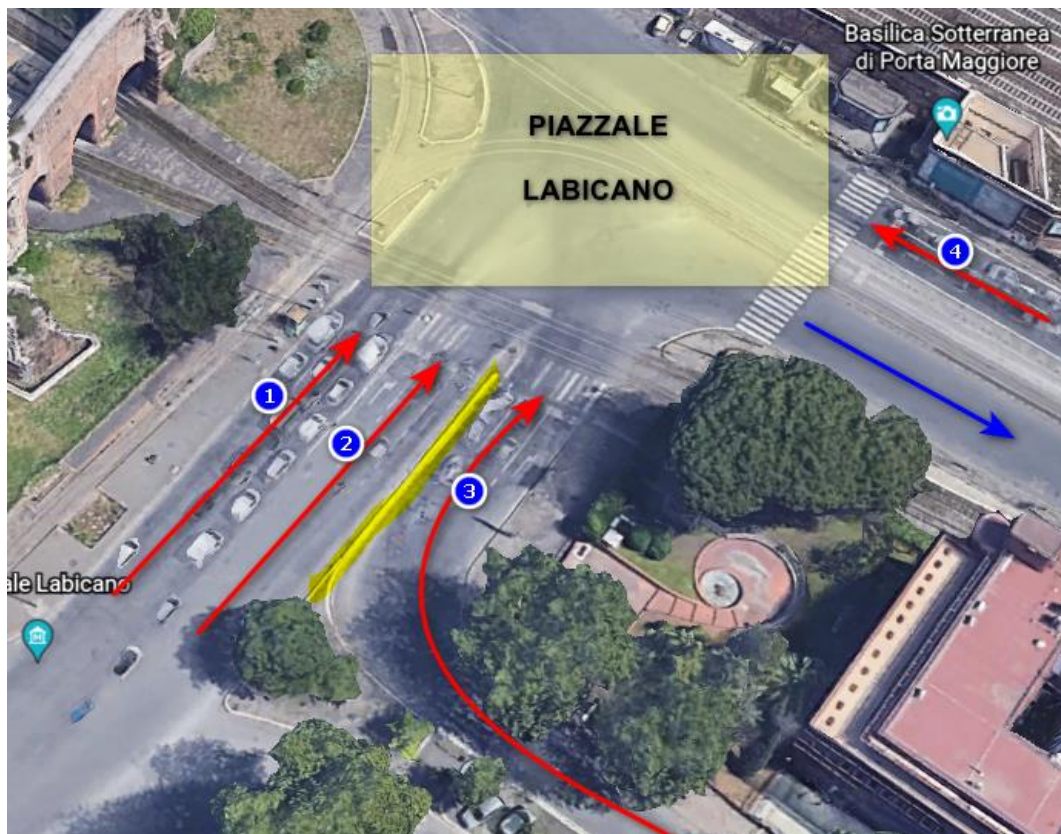
<b>Controllori</b>	<b>tipologia di veicoli</b>	<b>Controllori (Vissim)</b>	<b>SG (Vissim)</b>
1'11' - 13001-1- 0	privato	59 , 58 , 57 , 64	1
8 '81' - 13001-1- 7	pedonale		8
1 '12' - 13001-1- 0	TP	56	1
5 '51' - 13001-1- 4	privato	65	5
7 '71' - 13001-1- 6	pedonale		7
5 '52' - 13001-1- 4	TP	53	5
6 '63' - 13001-1- 5	TP	55	6
3 '3' - 13001-1- 2	privato	61 , 60	3
8 '82' - 13001-1- 7	pedonale		8
4 '4' - 13001-1- 3	privato	65	4
2 '2' - 13001-1- 1	privato	62, 63	2
7 '72' - 13001-1- 6	pedonale		7
6 '62' - 13001-1- 5	TP	54	6
6 '61' - 13001-1- 5	privato		6

*Tabella 2 gruppi segnale (SG), Piazza di porta Maggiore*

#### **4.1.1.3 Piazzale Labicano**

Piazzale Labicano è caratterizzato da un traffico intenso, essendo Via Prenestina una delle arterie più trafficate in accesso al nodo. Nelle corsie centrali, che con la loro prosecuzione formano un anello circolatorio attorno al monumento, il traffico proveniente da Via Casilina è fisicamente separato da quello proveniente dalla zona Sud-Ovest del nodo mediante un cordolo. La separazione oltre che fisica si preserva per i gruppi segnale, essendoci una possibile situazione di conflitto tra le manovre effettuate dalle correnti veicolari delle corsie centrali rispetto a quelle provenienti da via Casilina. In prossimità delle corsie centrali vi sono le corsie dedicate al trasporto pubblico, con la fermata Labicano/Porta Maggiore. In figura 13 è possibile notare il cordolo evidenziato, e le correnti di flusso principali che caratterizzano questa intersezione.





*figura 13 intersezione Piazzale Labicano, particolare sui flussi veicolari. (rossi flussi in entrata)*

Le correnti di flusso sono enumerate:

1. Le tre corsie interne ospitano i veicoli che intendono effettuare la svolta a sinistra.
2. Le tre corsie centrali sono caratterizzate dai veicoli che effettuano la svolta a destra in direzione di Via Prenestina.
3. Le tre corsie esterne e separate dal cordolo sono le tre corsie dalle quali i flussi provenienti da Via Casilina effettuano entrambe le svolte.
4. Il flusso da via Prenestina ha un'unica possibile direzione, ossia quella verso Via dello Scalo San Lorenzo.

La presente intersezione è configurata in Utopia ed è possibile visualizzare le attuali caratteristiche dalla piattaforma Omnia, quali i sistemi di misurazione presenti e l'attuale configurazione dei gruppi segnale.

La strumentazione presente è composta da sensori video dedicati al rilevamento e conteggio dei veicoli. Questi sistemi, anche chiamati "spire virtuali", sono presenti soprattutto lungo le corsie dedicate al trasporto pubblico. Gli unici sensori video utili per la stima dei flussi veicolari privati sono le spire SV1 ed SV8. Quest'ultima rileva i veicoli che effettuano la svolta a sinistra dalle corsie centrali in accesso al Piazzale Labicano. Lo strumento SV1 rileva i veicoli provenienti da Via Prenestina. La loro posizione presso la linea di arresto è tuttavia limitante, poiché permette la sola

stima dei veicoli che attraversano la linea di arresto durante la fase di verde, e non quella del flusso orario in arrivo al nodo. I sensori presenti sono evidenziati nella seguente figura 14 con rettangoli verdi e con il loro codice alfanumerico (codice usato in Omnia-Utopia).

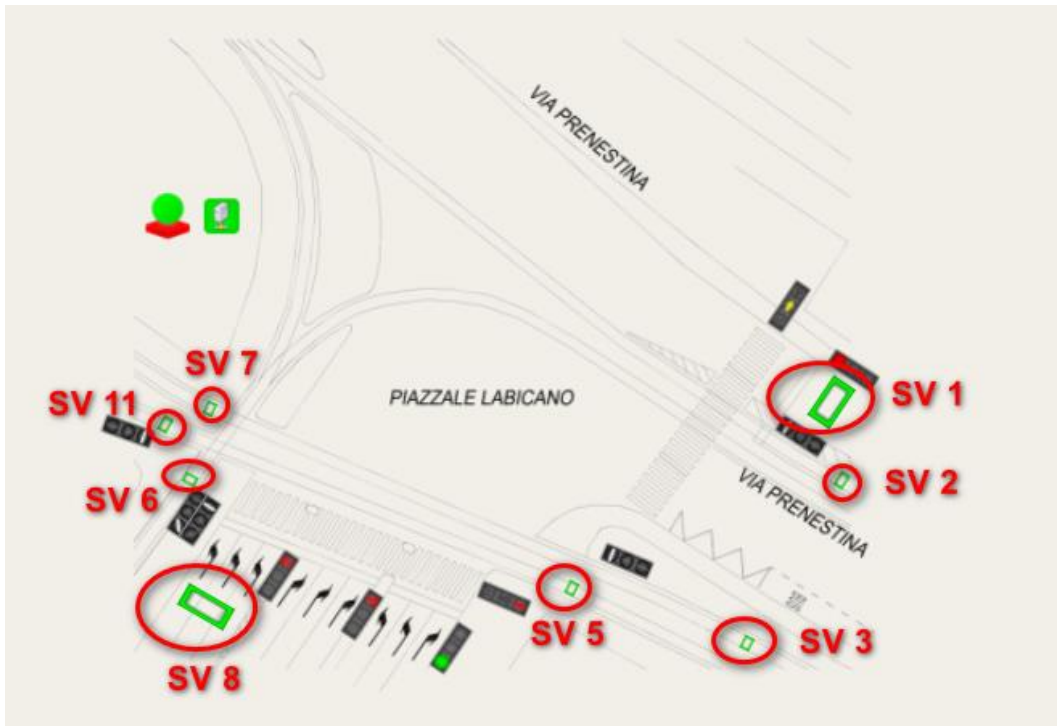


figura 14 dettaglio di incrocio (Omnia), Piazzale Labicano

I segnali semaforici e le fasi attualmente utilizzate sono riassunti nel seguente diagramma delle fasi. La durata del ciclo è di 123 secondi e non sono stati considerati i segnali pedonali che nella successiva tabella vengono invece riportati.

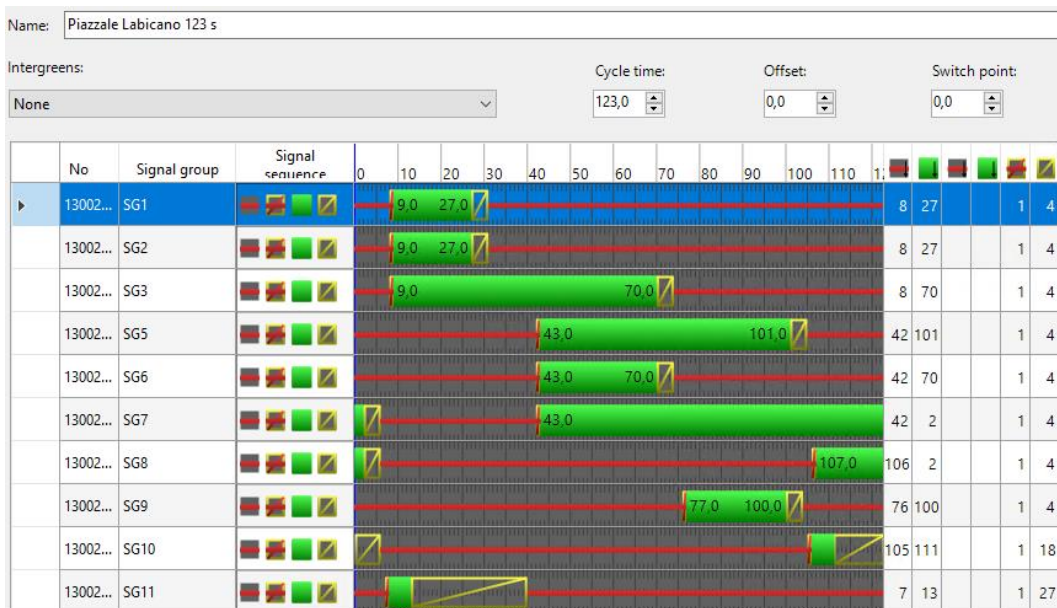


figura 15 piano semaforico originale, Piazzale Labicano

Nella seguente tabella è riportata l'associazione tra i codici delle lanterne e i gruppi segnale presenti in Utopia con i corrispondenti sul modello Vissim. È riportata l'indicazione riguardante la tipologia di veicoli che caratterizza il flusso servito da ciascun segnale.

Controllori (Omnia-Utopia)	tipologia di veicoli	Controllori (Vissim)	SG (Vissim)
1 '1' - 13002-1- 0	TP	16	1
7 '7' - 13002-1- 6	TP	1	7
6 '6' - 13002-1- 5	TP	14	6
9 '9' - 13002-1- 8	privato	8, 9, 10	9
5 '5' - 13002-1- 4	privato	11 , 12 , 13	5
8 '8' - 13002-1- 7	privato	5, 6, 7	8
11 '11' - 13002-1-10	pedonale		11
2 '2' - 13002-1- 1	TP	15	2
3 '32' - 13002-1- 2	TP	3	3
3 '31' - 13002-1- 2	privato	2,4	3
10 '10' - 13002-1- 9	pedonale		10

Tabella 3 gruppi segnale (SG), Piazzale Labicano

#### 4.1.1.4 Via prenestina-Deposito Atac

Via Prenestina è regolata a circa 800 metri a monte del Piazzale Labicano da un sistema di controllori tradizionali a fasi fisse (figura 16).



figura 16 Via Prenestina-deposito ATAC, particolare sui flussi in ingresso

Il flusso di interesse è numerato, e rappresenta il flusso che percorre via Prenestina in direzione di Piazzale Labicano. Nella figura precedente si può osservare la sopraelevata di accesso alla tangenziale Est, che si dirama da Via Prenestina circa 350 metri a monte dell'intersezione in oggetto.



figura 17 dettaglio di incrocio (Omnia), Via Prenestina-deposito ATAC

Il ciclo semaforico a fasi fisse è in realtà composto da due fasi, una per i veicoli ed una dedicata al traffico pedonale. La fase di verde per i veicoli privati e pubblici è in realtà una fase ininterrotta se non avviene la chiamata da parte del traffico pedonale. Per facilità in questo studio la fase pedonale a chiamata è stata considerata sempre presente. In tale configurazione il ciclo per il traffico veicolare quindi diviene il seguente:

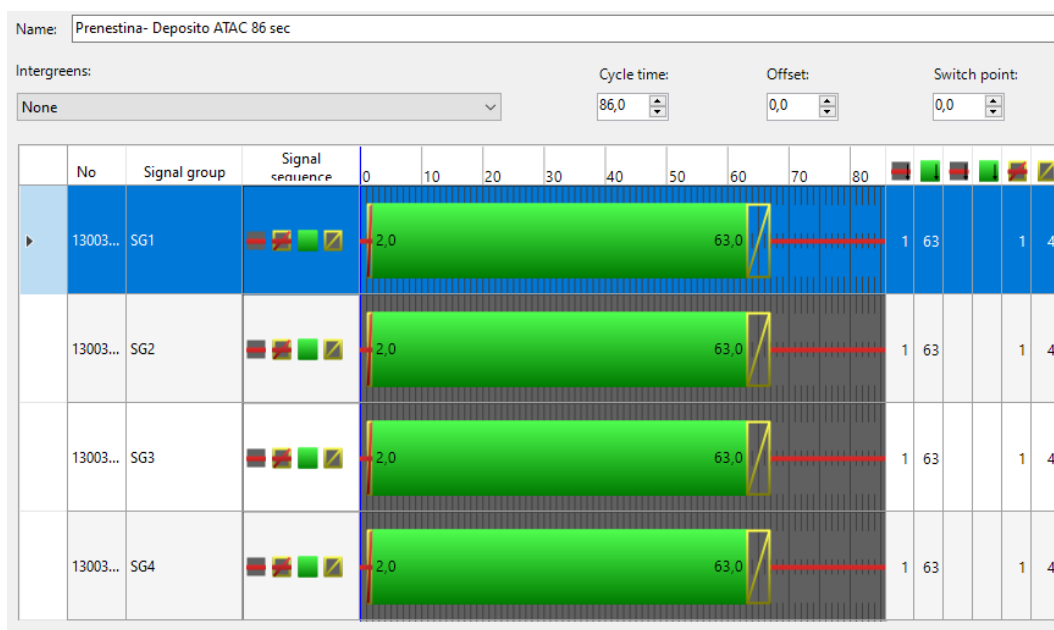


figura 18 piano semaforico originale, Via Prenestina-deposito ATAC

Non sono stati considerati i gruppi segnale relativi agli attraversamenti pedonali, che hanno una fase dedicata al passaggio (verde e giallo) di 19 secondi, che corrisponde alla fase di rosso del traffico veicolare. Come si può osservare nell'immagine precedente il ciclo semaforico ha una fase di tuttorosso iniziale di un secondo.

#### 4.1.1.5 Piazza Santa Croce in Gerusalemme

Questa intersezione si trova a Sud-Ovest del nodo di Porta Maggiore, come descritto nel capitolo di “Descrizione generale dello Stato di Fatto”. In realtà l'intersezione si compone di due nodi coordinati vicini il cui sistema semaforico è gestito da un sistema di controllo unico, ma per semplicità di modellazione è stato considerato solo il secondo nodo, avendo infatti l'unico obiettivo di generare veicoli con una frequenza corrispondente alle fasi del sistema semaforico configurato. Nella seguente figura tale nodo è indicato con il numero 2 (figura 19).

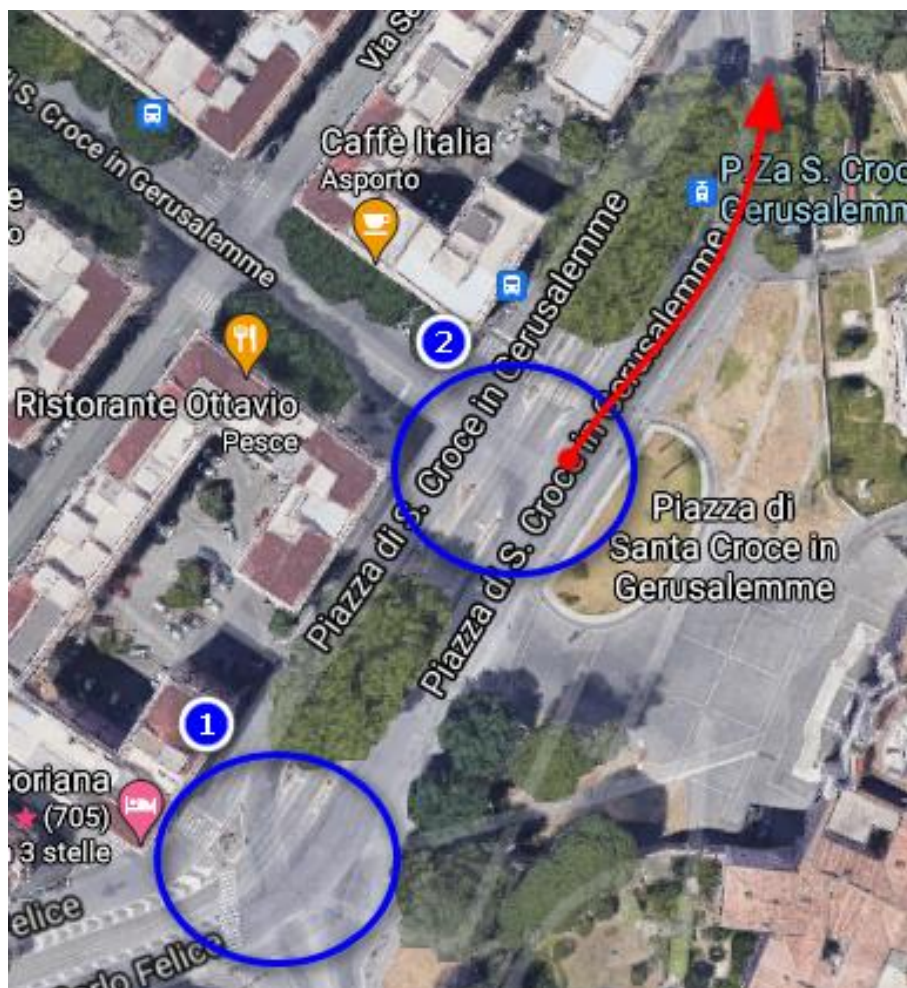


figura 19 schema dei flussi, Piazza di Santa Croce in Gerusalemme

Da questa piazza ha origine Via Eleniana, caratterizzata da un flusso importante che accede al nodo di Porta Maggiore, in particolare presso le corsie centrali di accesso a piazzale Labicano. Il controllo semaforico presente non è stato dedotto dalla piattaforma Omnia, non essendo gestito da Swarco

Mizar, ma direttamente fornito da RSM attraverso le tavole esecutive. Si riporta nell'immagine seguente il Diagramma di Fasatura, con evidenziate le fasi di interesse al nodo 2 (figura 20).

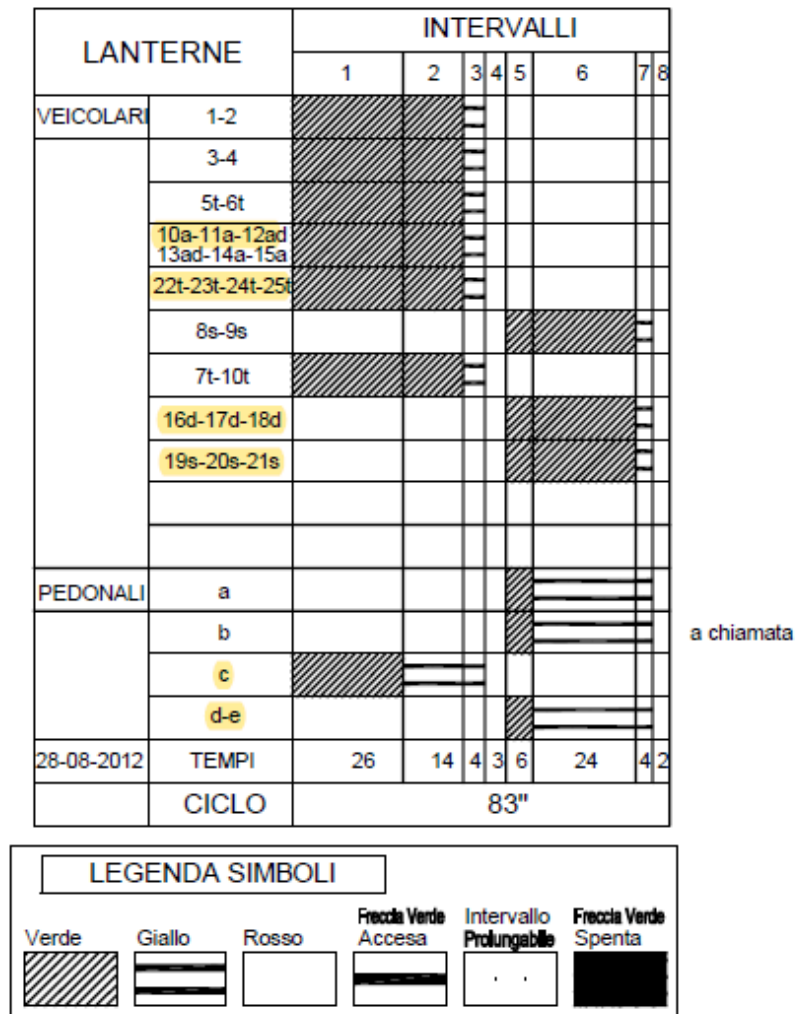


figura 20 diagramma di fasatura, Piazza di Santa Croce in Gerusalemme

E le corrispondenti manovre rappresentate:

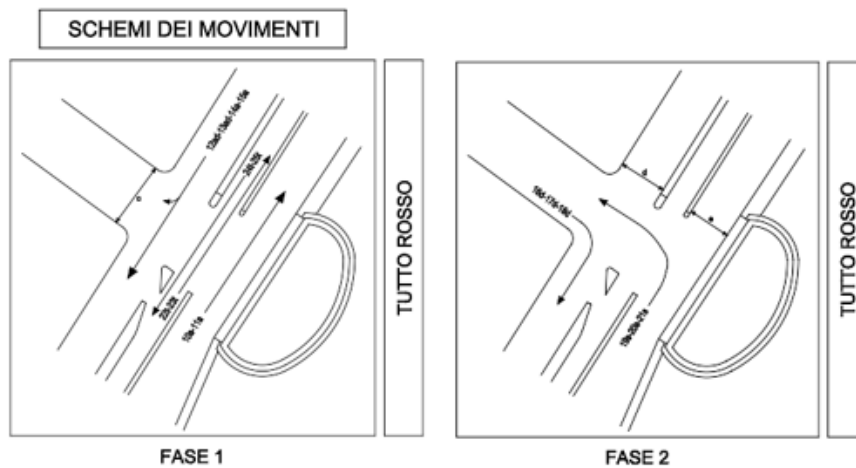


figura 21 schema dei movimenti, Piazza di Santa Croce in Gerusalemme

Il piano semaforico caricato in ambiente di simulazione è rappresentato nello schema seguente. (figura 22)

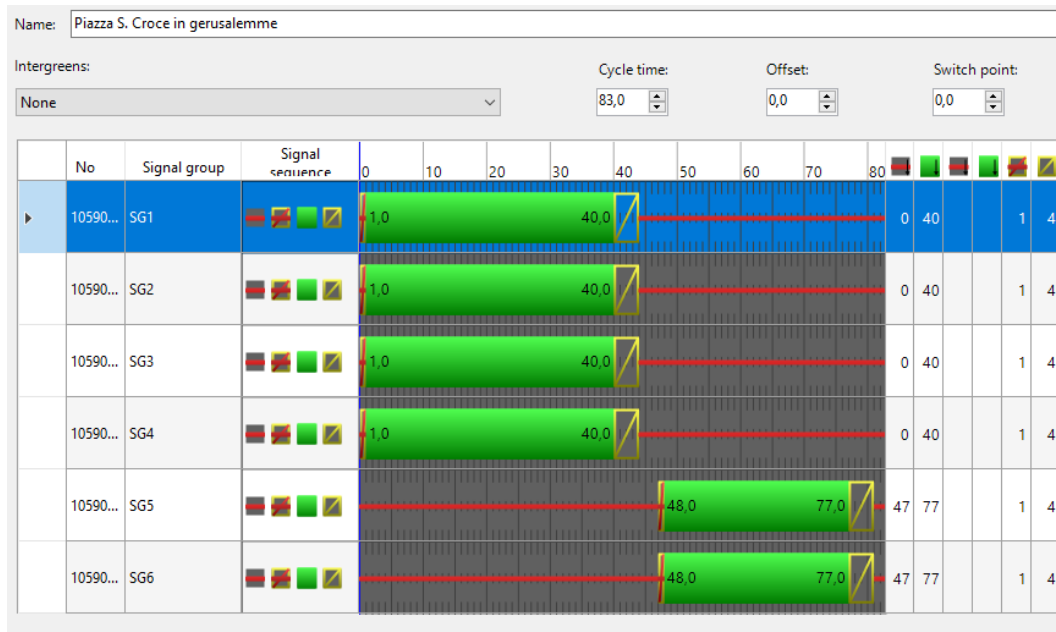


figura 22 piano semaforico originale, Piazza di Santa Croce in Gerusalemme

Non sono stati considerati gli attraversamenti pedonali, ma soltanto i gruppi segnale dedicati al traffico veicolare pubblico e privato.

#### 4.1.2 Domanda di mobilità

Il nodo di Roma Porta Maggiore è caratterizzato da un notevole flusso veicolare, sia privato che appartenente al trasporto pubblico. Seguendo le indicazioni del parter di Swarco, Roma Servizi per la Mobilità, la matrice origine/destinazione relativa al nodo è una matrice con i flussi ridotti del 30% rispetto alla originale matrice, che rappresentava la condizione del traffico prima della pandemia Covid19. Dalle ricerche condotte da Roma Mobilità si evince che il flusso al nodo sia diminuito di circa il 20%, riduzione da imputarsi alla minore presenza di lavoratori che si recano presso il luogo di lavoro (home working) e alla parziale chiusura o limitato accesso presso le istituzioni scolastiche e pubbliche in generale. Il confronto della mobilità è in realtà stato effettuato per il 2020, ma i dati si conservano simili nel 2021. In particolare, per ottenere questo fattore di riduzione, i dati relativi ai mesi del 2020 sono stati confrontati con i dati dei mesi del 2019, ovvero la situazione pre-pandemia. I dati sono stati ottenuti attraverso le stazioni di misura, composte soprattutto di sensori Bluetooth e dispositivi video, presenti lungo le direttrici principali, tra le quali Via Prenestina. A seguire sono presentati gli andamenti del flusso nei mesi da marzo a giugno 2020, con l'indicazione della riduzione in % rispetto al 2019.

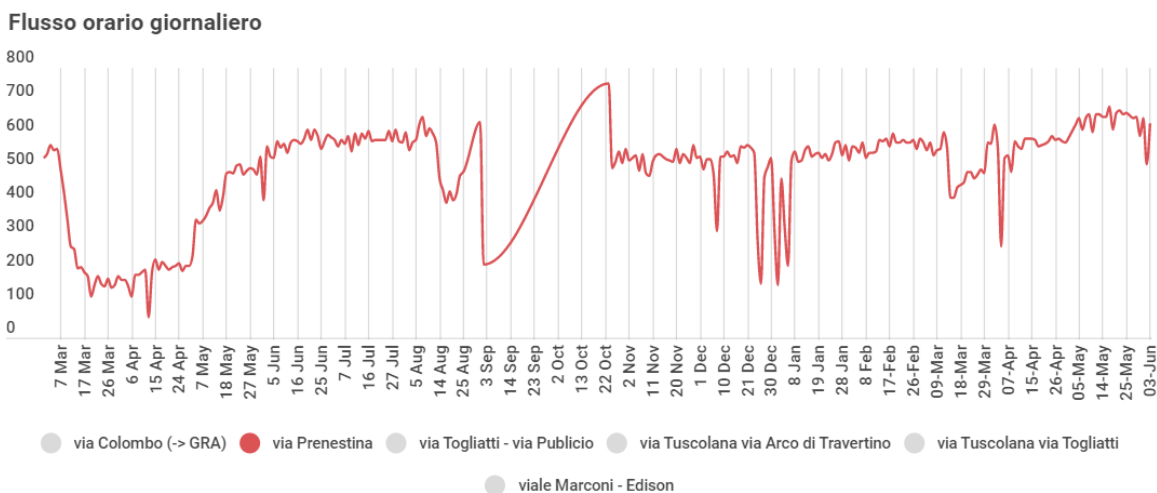


figura 23 traffico rilevato durante la pandemia Covid19, Via Prenestina, anno 2020

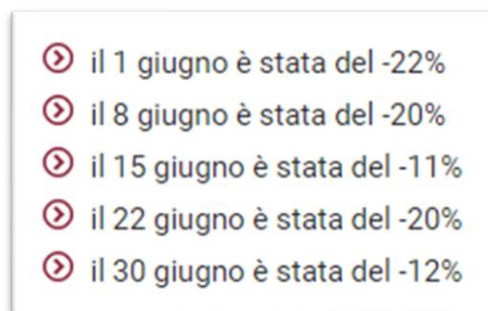


figura 24 riduzione dei flussi veicolari misurati nel 2020 rispetto al 2019



La diminuzione del 30% considera quindi un margine leggermente più alto di quello dedotto dalle analisi del 2020, come indicato da Roma Servizi per la Mobilità.

#### 4.1.2.1 Analisi della domanda: stazioni di rilevamento

Nel dettaglio si vuole studiare la domanda di mobilità fornita e modificata secondo le disposizioni di RSM, confrontandola con i flussi rilevati dalle stazioni di misurazione attive e configurate in Utopia. Tali sensori sono stati previamente descritti nei capitoli precedenti. La domanda originale in condizione pre-pandemica è riportata nella seguente matrice O/D:

O\D	Via_Prenestina	Via dello scalo San lorenzo	Via_Giolitti	Via_di_Porta_Maggiore	Via_Statilia	Piazzale_Porta_Maggiore	Via_Casilina	TOT Orig.
Via Casilina	22	177	386	130	77	62	0	854
Via Prenestina	3	90	401	249	182	282	6	1213
Via Scalo San Lorenzo	54	0	225	181	398	1112	90	2060
Via di Porta Maggiore	78	72	0	0	41	88	88	367
Via Eleniana	359	787	141	35	37	22	146	1527
TOT Dest.	516	1126	1153	595	735	1566	330	6021

figura 25 originale matrice dei flussi origine destinazione O/D

Che ridotta del 30% porta ad un volume totale nell'ora di punta considerata da circa seimila veicoli a quattromiladuecento veicoli:

O\D	Via_Prenestina	Via dello scalo San lorenzo	Via_Giolitti	Via_di_Porta_Maggiore	Via_Statilia	Piazzale_Porta_Maggiore	Via_Casilina	TOT Orig.
Via Casilina	15	124	270	91	54	43	0	598
Via Prenestina	2	63	281	174	127	197	4	849
Via Scalo San Lorenzo	38	0	158	127	279	778	63	1442
Via di Porta Maggiore	55	50	0	0	29	62	62	257
Via Eleniana	251	551	99	25	26	15	102	1069
TOT Dest.	361	788	807	417	515	1096	231	4215

figura 26 matrice ridotta dei flussi origine destinazione O/D



figura 27 schema dei flussi, nodo di Porta Maggiore

I flussi misurati dalle stazioni sono disponibili attraverso la piattaforma Omnia. I flussi considerati nell'analisi sono i flussi dei mesi di aprile e maggio; pertanto, viene considerato il profilo dei volumi in veicoli ora per tale periodo. L'obiettivo in questa fase è calibrare in modo discreto la domanda da modellare, individuando se presenti, diversi scenari in un giorno tipo.

Il giorno considerato è un giorno feriale centrale alla settimana con una condizione meteorologica soleggiata, che dall'analisi dei profili giorno è risultata la condizione più trafficata. Pertanto, viene creato il profilo per ogni stazione di misura dei flussi rilevati per i giorni di martedì, mercoledì e giovedì, definiti da Omnia in generale come "Thursday" con condizioni meteo conformi.

#### 4.1.2.1.1 Intersezione di Via di Porta Maggiore-Viale Manzoni

Come descritto in precedenza, si considera il flusso proveniente da Via di Porta Maggiore si conservi pressoché invariato a valle dell'intersezione. Presso la spira a monte il flusso è misurato. Nel grafico successivo è rappresentato il confronto tra il profilo dei volumi e il segmento orizzontale che rappresenta il flusso imposto nella matrice O/D statica:

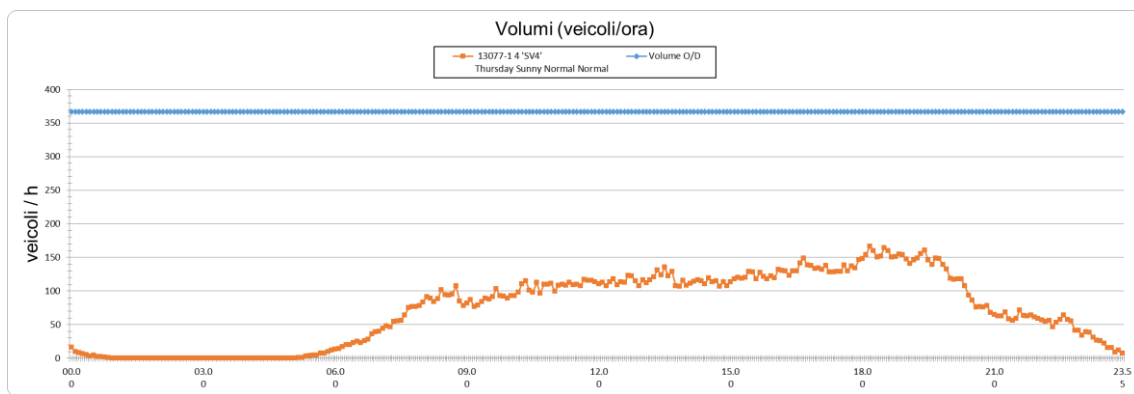


figura 28 flussi misurati spira SV4 rispetto a flussi da matrice O/D

Il flusso presente nella O/D originale è di circa trecentosessanta veicoli, mentre il massimo flusso misurato è pari a circa centosessantasette veicoli.

	<b>Flusso O/D</b>	<b>Flusso di Picco misurato</b>	<b>Flusso medio giornaliero</b>
	[veh/h]	[veh/h]	[veh/h]
	367	167	112
	differenza dal flusso O/D (%)	-54,63%	-69,45%

Tabella 4 flussi misurati spira SV4 rispetto a flussi da matrice O/D

Si osserva come in realtà il flusso sia molto minore di quello originale, e che durante il picco pomeridiano che si osserva tra le ore 18:15 e 19:15 vi sia un flusso che è circa dimezzato rispetto alla matrice O/D originale.

#### 4.1.2.1.2 Piazzale Labicano

Come descritto in precedenza, presso Piazzale Labicano si hanno due spire, la SV1 relativa a Via Prenestina e la SV8 relativa alle corsie per la svolta a sinistra di Piazzale Labicano. Nel grafico riportato nella seguente figura 29 è rappresentato il confronto tra il profilo dei volumi e il segmento orizzontale che rappresenta il flusso imposto nella matrice O/D statica per la spira SV1:

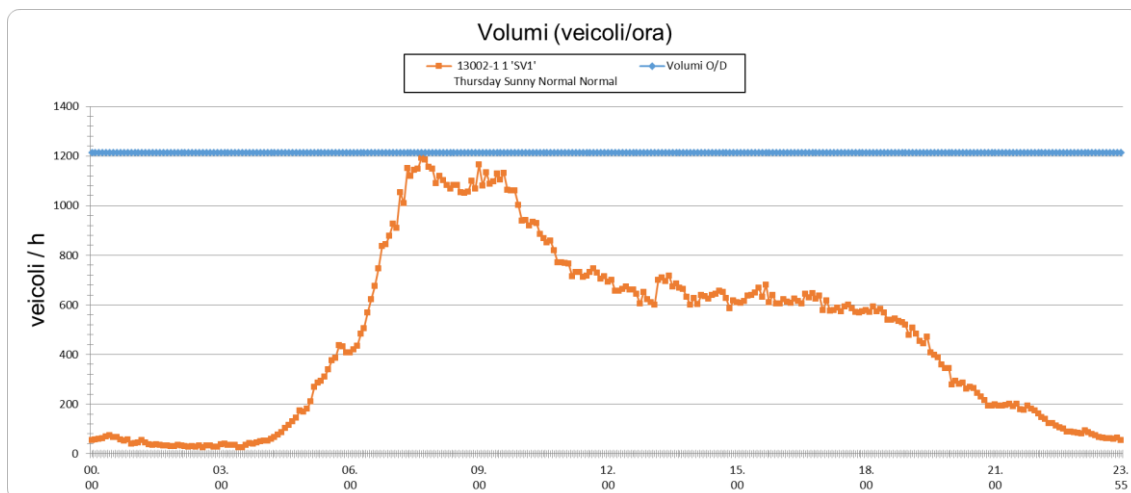


figura 29 flussi misurati spira SV1 rispetto a flussi da matrice O/D

Il flusso presente nella O/D originale è di circa milleduecento veicoli e corrisponde al massimo flusso misurato dello scenario mattutino.

	<b>Flusso O/D</b>	<b>Flusso di Picco misurato</b>	<b>Flusso medio giornaliero</b>
	[veh/h]	[veh/h]	[veh/h]
	1213	1191	766
	differenza dal flusso O/D (%)	-1,78%	-36,87%

Tabella 5 flussi misurati spira SV1 rispetto a flussi da matrice O/D

Durante il picco mattutino, che perdura per circa 170 minuti, dalle ore 7:10 alle ore 10:00 con una leggera diminuzione verso le ore 8:45, Via Prenestina è caratterizzata da un flusso pressoché costante e pari a quello presente nella matrice O/D originale. Una riduzione di tale flusso non è realistica.

Per quanto riguarda il sensore SV8, la domanda misurata rispetto alla matrice O/D è rappresentata in figura 30:

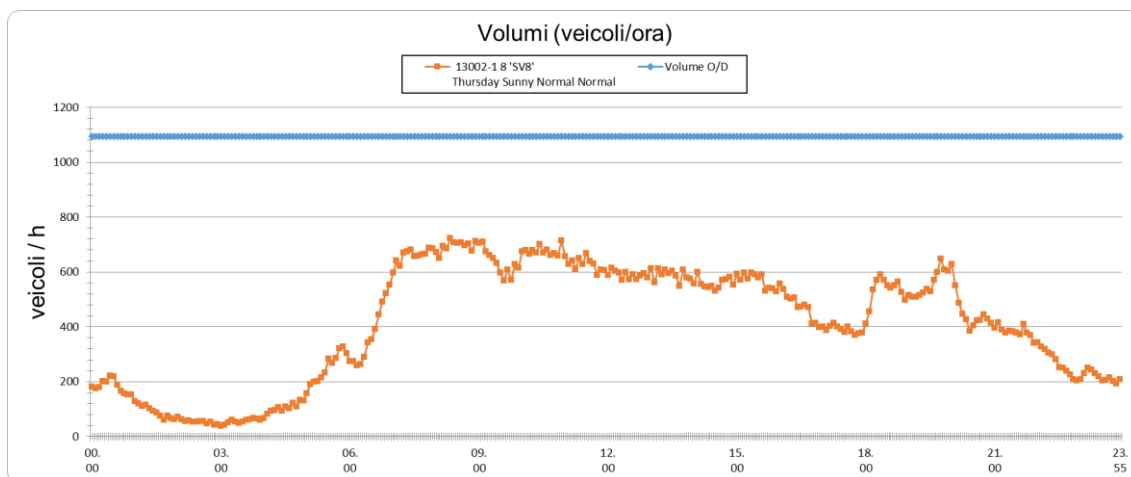


figura 30 flussi misurati spira SV8 rispetto a flussi da matrice O/D

Il flusso presente nella O/D originale è di circa millecento veicoli ed è confrontabile se ridotto del 30% con il flusso di picco mattutino misurato, pari a circa settecentoventi veicoli.

Flusso O/D	Flusso di Picco misurato	Flusso medio giornaliero
[veh/h]	[veh/h]	[veh/h]
1094	724	583
differenza dal flusso O/D (%)	-33,85%	-46,72%

Tabella 6 flussi misurati spira SV8 rispetto a flussi da matrice O/D

Una riduzione del 30% per il flusso in condizioni di picco è quindi realistica rispetto ai volumi misurati. La condizione di picco in particolare corrisponde agli intervalli giornalieri tra le 07:00 e le 09:00, tra le 10:20 e le 11:00 e al pomeriggio nell'intorno delle 19:50.

#### 4.1.2.2 Scenari di domanda

Effettuando il confronto tra le curve di domanda in corrispondenza delle tre stazioni di misura, si individuano principalmente due condizioni critiche: un picco mattutino esteso che si protrae circa dalle ore 07:20 alle ore 09:30 ed un picco pomeridiano meno esteso, dalle ore 18:20 alle ore 20:30.

Tali scenari sono evidenziati con un riquadro di colore rosso nella seguente immagine, che rappresenta il grafico delle curve di domanda analizzate.

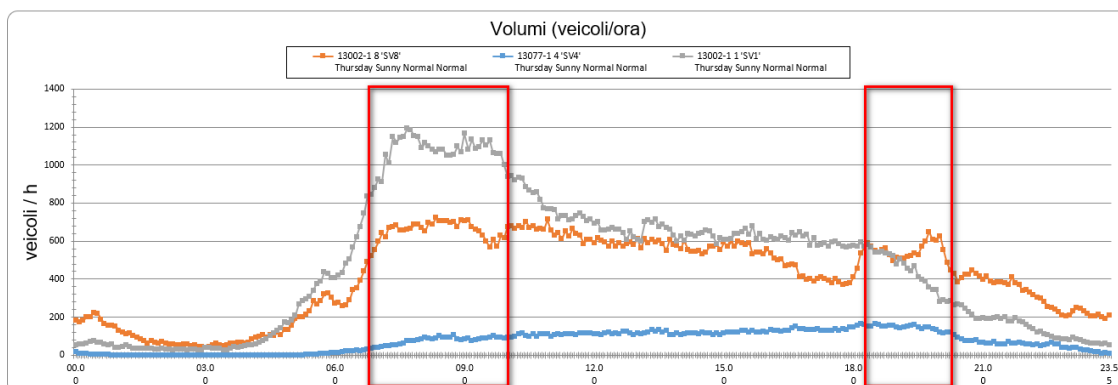


figura 31 individuazione grafica dei picchi orari giornalieri

Si analizzano quindi le matrici O/D che saranno la domanda simulata in ambiente di simulazione attraverso l'utilizzo del software Vissim. Per gli accessi ove non è presente alcuna misurazione, si impostano i flussi come suggerito da Roma Servizi per la Mobilità che verrà successivamente definita anche come "RSM".

#### 4.1.2.3 Scenario 1: flusso di picco mattutino

Il flusso registrato permette la creazione della matrice O/D di riferimento, con le seguenti modifiche rispetto alla matrice di domanda originale:

- Riduzione del 50% del flusso proveniente da Via di Porta Maggiore;
- Riduzione del 30 % del flusso proveniente da Via Eleniana;
- Riduzione del 30 % del flusso proveniente da Via Scalo San Lorenzo;

RSM ha consigliato di non applicare il fattore di riduzione alle arterie provenienti dalla periferia Sud-Est, ovvero Via Casilina e Via Prenestina. Al mattino, infatti, il traffico che affluisce in città è piuttosto elevato ed il nodo è maggiormente percorso in direzione del centro. Le percentuali di svolta ad ogni intersezione/ strada in uscita dal nodo rimangono le stesse della O/D originale. La composizione dei flussi dalla matrice O/D ottenuta corrisponde alla diminuzione del flusso atteso in corrispondenza delle corsie centrali a Piazzale Labicano che effettuano la svolta a sinistra, che risulta circa pari al 30% (valore atteso).

La matrice O/D così ottenuta è la seguente:

O/D	Via Prenestina	Via dello scalo San lorenzo	Via_Giolitti	Via di Porta Maggiore	Via Statilia	Piazzale Porta Maggiore	Via Casilina		tot Orig
Via Casilina	22	177	386	130	77	62	0		854
Via Prenestina	3	90	401	249	182	282	6		1213
Via Scalo San Lorenzo	38	0	158	127	279	778	63		1442
Via di Porta Maggiore	39	36	0	0	21	44	44		184
Via Eleniana	251	551	99	25	26	15	102		1069
tot Dest	353	854	1043	530	584	1182	215		4761

*figura 32 matrice O/D, picco orario mattutino*

E la matrice dei flussi da inserire nel modello come "Vehicle Input" diviene la seguente:

Vissim_link : Via Origine	Volume (veicoli/ora)
11: Via_Casilina	854
3: Via Prenestina	1213
1: Via dello scalo San lorenzo	1442
23: Via di Porta Maggiore	184
32: Via_Eleniana	1069

*figura 33 matrice di generazione veicoli ambiente di simulazione Vissim, picco mattutino*

#### 4.1.2.4 Scenario 2: flusso di picco pomeridiano

Il flusso registrato permette la creazione della matrice O/D di riferimento, con le seguenti modifiche rispetto alla matrice di domanda originale:

- Riduzione del 50% del flusso proveniente da Via di Porta Maggiore;
- Riduzione del 30 % del flusso proveniente da Via dello Scalo San Lorenzo;
- Riduzione del 50% del flusso proveniente da Via Prenestina

RSM ha consigliato di ridurre i flussi da Via Prenestina in quanto nell'orario serale è caratterizzata maggiormente dal flusso uscente, in direzione periferica rispetto al centro di Roma. Per questo motivo RSM ha fornito una modifica delle percentuali di svolta che provengono da Via Eleniana, particolarmente trafficata in questo orario, aumentando il flusso uscente da Via Prenestina e Casilina. Le restanti percentuali di svolta rimangono invariate, ovvero corrispondenti alla matrice O/D originale. Anche nello scenario pomeridiano è atteso un flusso in corrispondenza delle corsie centrali a Piazzale Labicano ridotto del 30% rispetto alla matrice O/D fornita. Questo valore è verificato.

La matrice O/D così ottenuta è la seguente:

O/D	10: Via_Prenestina	2: Via dello scalo San Lorenzo	20: Via_Giolitti	22: Via_di_Porta_Maggiore	28: Via_Stattilia	44: Piazzale_Porta_Maggiore	12: Via_Casilina		tot Orig
Via Casilina	22	177	386	130	77	62	0		854
Via Prenestina	2	45	201	125	91	141	3		607
Via Scalo San Lorenzo	38	0	158	127	279	778	63		1442
Via di Porta Maggiore	39	36	0	0	21	44	44		184
Via Eleniana	605	504	141	35	37	22	183		1527
tot Dest	705	762	885	416	504	1047	293		4613

figura 34 matrice O/D, picco orario pomeridiano

E la matrice dei flussi da inserire nel modello come "Vehicle Input" diviene la seguente:

Vissim_link : Via Origine	Volume (veicoli/ora)
11: Via_Casilina	854
3: Via Prenestina	607
1: Via dello scalo San Lorenzo	1442
23: Via_di_Porta_Maggiore	184
32: Via_Eleniana	1527

figura 35 matrice di generazione veicoli ambiente di simulazione Vissim, picco pomeridiano

### **4.1.3 Affinamento del modello**

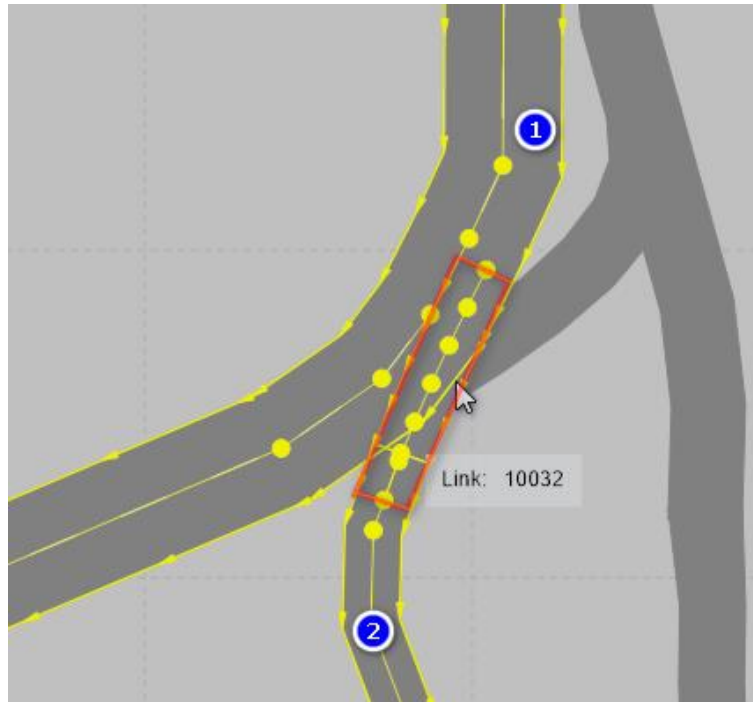
Il presente capitolo descrive le successive modifiche apportate al modello Vissim messo a disposizione da RSM. Il modello originale, sviluppato nel 2010, è stato modificato dall'università Sapienza di Roma nel 2020. Tuttavia, dall'osservazione successiva alle prime simulazioni svolte, sono risultate necessarie alcune modifiche, al fine di ottenere una modellazione più fedele al reale deflusso del traffico. In particolare, a partire dal modello fornito e nel seguito definito come modello V1, si sono apportate alcune modifiche di diversa natura, presentate in dettaglio nei paragrafi a seguire, e che hanno permesso di ottenere una versione del modello finale, definita come V3 (con una versione V2 intermedia). Tale ultima versione del modello è stata lo strumento principale attraverso il quale performare le successive analisi.

#### **4.1.3.1 Elementi preservati durante l'affinamento del modello**

I modelli conservano in generale alcune caratteristiche in comune: la domanda di mobilità implementata, sia veicolare privata che relativa alle linee dei mezzi pubblici, i gruppi segnale implementati in ogni incrocio appartenente al nodo, i parametri di simulazione. Quest'ultimi sono descritti nei capitoli dedicati. Inoltre, vengono mantenute inalterate la maggior parte delle geometrie dei link e dei connettori, e i parametri di definizione dei percorsi, creati con il menu di "Vehicle Route" di Vissim per rispecchiare la matrice O/D del picco orario analizzato.

#### **4.1.3.2 Modifiche di natura geometrica**

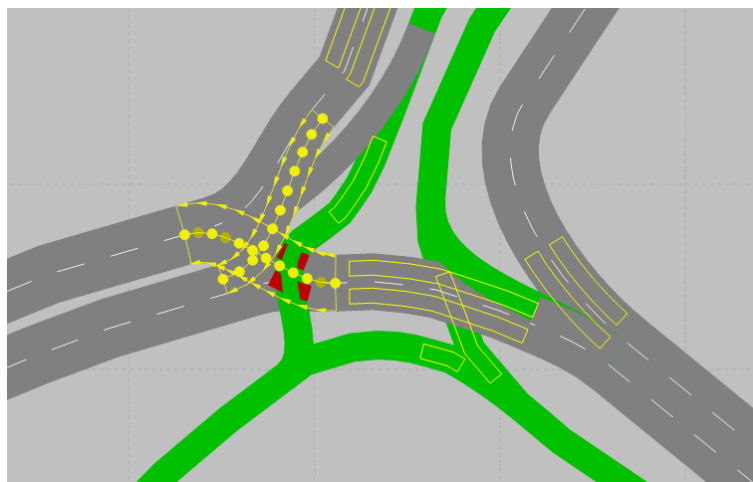
Le principali discrepanze tra la condizione originale presente nel modello V1 e la reale condizione di deflusso riguardano la geometria stessa di alcune sezioni, definite "link" in ambiente Vissim. Queste sezioni possono essere di due tipologie: link normali, coincidenti con porzioni di carreggiata a singolo senso di marcia con proprietà geometriche ben definite ed omogenee (numero di corsie, larghezza, segnaletica orizzontale), oppure link di collegamento (anche denominati connettori). Questi ultimi hanno la funzione di collegare due link di tipo normale, permettendo ai veicoli simulati di effettuare le manovre di cambio corsia o di svolta presso le intersezioni. Hanno anche la funzione di collegare due sezioni con caratteristiche omogenee, non essendo possibile nel software Vissim il collegamento tra due segmenti stradali con caratteristiche eterogenee (figura 36).



*figura 36 particolare di link di collegamento tra link normali, Vissim (PTV)*

La manovra di cambio corsia suddetta è fondamentale per la modellazione, permettendo ai veicoli di assestarsi sulle opportune corsie per proseguire sulla propria rotta ed effettuare quindi la corretta manovra. Una errata configurazione dei link di collegamento può creare alcune aree di conflitto tra le correnti veicolari, portando nella simulazione a rallentamenti e conseguente congestione, situazione che nella condizione reale di deflusso non trova riscontro.

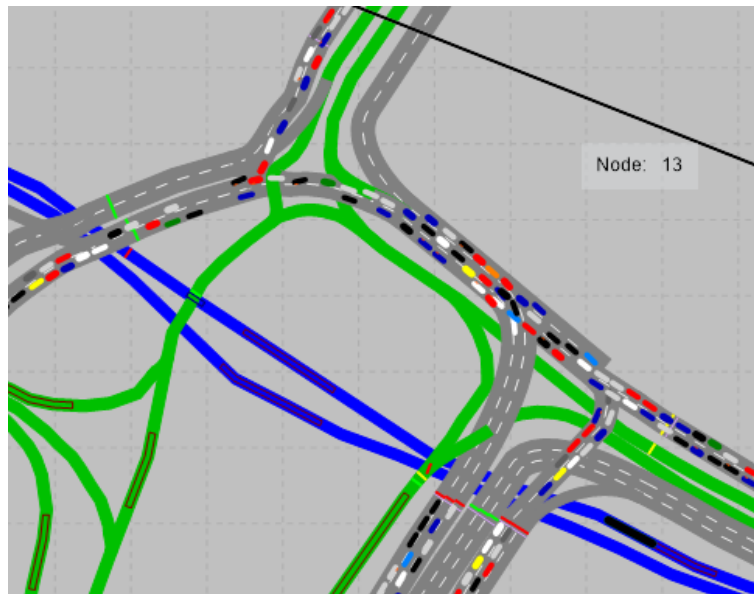
L'errore appena descritto era presente nella versione V1 del modello, ove creava rallentamenti non realistici presso l'accesso al nodo da Via dello Scalo San Lorenzo. In particolare, in questa sezione le correnti veicolari provenienti da Piazzale Labicano entrano in conflitto con i veicoli provenienti da Via dello Scalo San Lorenzo che hanno come destinazione dopo la svolta le corsie interne di Piazza di Porta Maggiore (figura 37).



*figura 37 zone di conflitto, Via Scalo San Lorenzo-Piazzale Labicano*



Questo nella simulazione produce un effetto negativo, ovvero il blocco totale del traffico simulato dopo 900 secondi, cioè 15 minuti (figura 38).



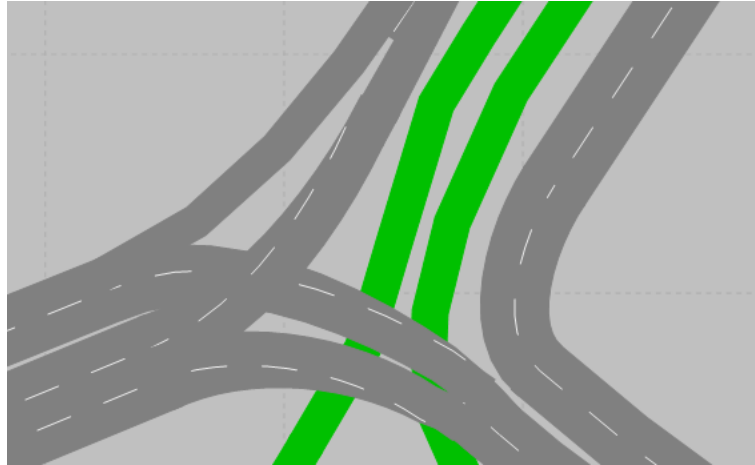
*figura 38 fenomeno di congestione, minuto 15 simulazione Vissim (PTV)*

Nella figura seguente è riportata la fotografia dell'accesso alla Piazza da Via dello Scalo San Lorenzo. Si deduce come il traffico confluisca al di sotto del primo arco da destra, essendo la naturale prosecuzione delle corsie della via in questione, che accede al nodo tramite un sottopasso (figura 39).



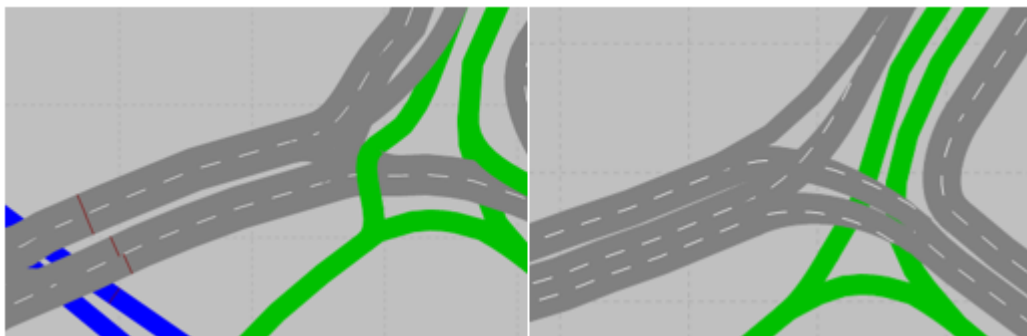
*figura 39 sottopasso e accesso al nodo, Via dello Scalo San Lorenzo*

Nella nuova versione del modello è stata apportata la dovuta modifica al link di collegamento, rappresentata in (figura 40)

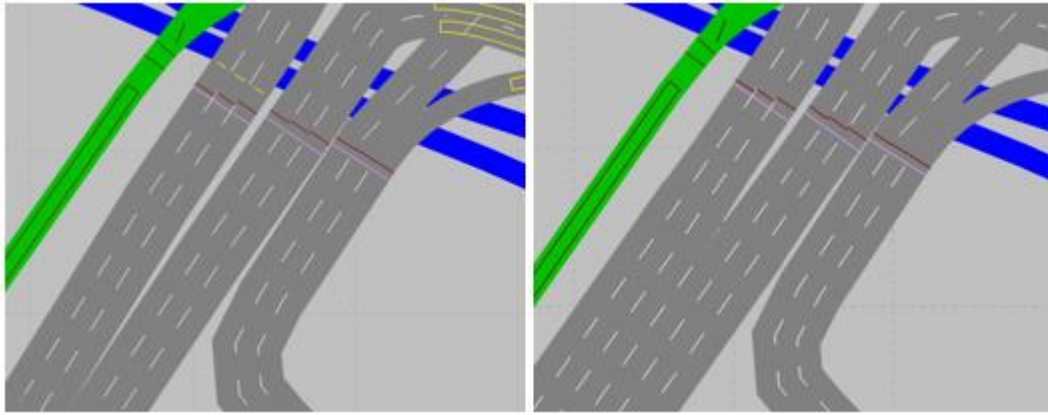


*figura 40 modifiche ai link di collegamento, modello V2 e V3*

Un caso leggermente differente di errata configurazione nel modello V1 è la modellazione delle corsie centrali di Piazzale Labicano e di Piazza di Porta Maggiore. Quest'ultima nella versione V1 era modellata con due differenti strade parallele di due corsie ciascuna, con il medesimo gruppo segnale. Il segmento a monte di Piazzale Labicano era composto invece da un'unica sezione a tre corsie. Nel modello V2 questo segmento unico è stato separato, ed il numero di corsie è stato modificato per simulare il reale deflusso, da tre corsie in sezione unica a due sezioni di due corsie ciascuna. Allo stesso modo presso Piazza di porta Maggiore le corsie interne sono passate da due a tre. In tale configurazione, la manovra di cambio corsia avviene in modo più diffuso e la coda che si forma in caso di congestione rappresenta meglio la situazione reale di attestamento alla linea di arresto. Mancando infatti nella realtà la segnaletica orizzontale per entrambe le sezioni suddette, i veicoli tendono ad assestarsi rispettivamente su più corsie di quelle presenti. Nelle seguenti figure si può osservare il modello prima e dopo la modifica (figura 41-42).

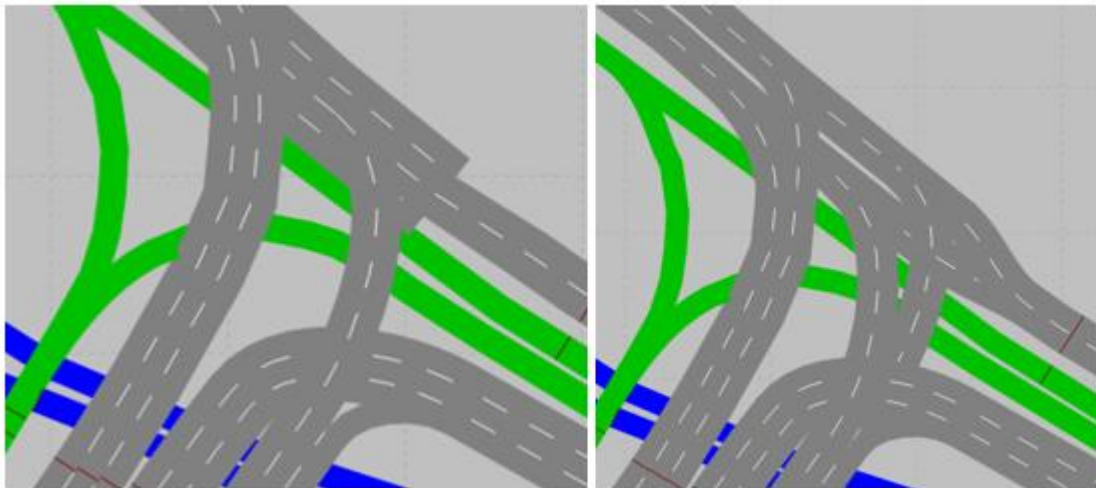


*figura 41 modifiche ai link di Piazza di Porta Maggiore*



*figura 42 modifiche ai link di Piazzale Labicano*

Nella versione V2, presso Piazzale Labicano è stata modificata la geometria dei connettori per separare i flussi che effettuano le svolte nelle due sezioni che connettono Piazzale Labicano a Piazza di Porta Maggiore citate nel paragrafo precedente. In questo modo le correnti di traffico non si ostacolano e viene eliminata la probabilità di avere movimenti erronei di cambio corsia ritardato.



*figura 43 modifiche a Piazzale Labicano*

La versione V3 definitiva preserva tali nuove configurazioni.

#### **4.1.3.3 Modifiche di natura matematica: modelli e parametri**

Complementare alla modifica della geometria per favorire il deflusso e le corrette manovre di cambio corsia, alcuni interventi sui parametri del modello si sono resi necessari: il fenomeno, denominato nella letteratura anglosassone come “lane changing“, è regolato da alcuni modelli matematici, come il complementare fenomeno di “car following”. Nella micro-simulazione, infatti, il movimento di ciascun veicolo, simulato come unità singola, è regolato rispetto al movimento del veicolo che lo precede, secondo un modello di “car following”, e rispetto alla direzione definita tramite la matrice O/D attraverso la quale il cammino prescelto è definito. Nell’effettuare il cambio corsia per percorrere il cammino tra origine e destinazione diventa fondamentale l’interazione con le corsie adiacenti e i veicoli che le percorrono: ecco che il secondo modello di “lane changing“ contiene le regole e i parametri perché ciò avvenga con un accettabile margine di sicurezza e considerando i veicoli sulle corsie adiacenti, a monte e a valle. I modelli principali per il “lane changing“ sono il Wiedermann 99, solitamente utilizzato in ambito extraurbano, ed il Wiedermann 74, che è consigliato in ambito urbano. Erroneamente nella versione originale del modello era presente il primo dei due modelli citati: trattandosi di uno scenario di traffico urbano congestionato in letteratura è indicato il Wiedermann 74 come migliore scelta. I parametri interni al modello stesso, quali caratteristiche cinematiche e coefficienti correttivi, sono stati mantenuti con i valori di default suggeriti nella guida utenti del software, “Vissim User Guide, 2021”.

Per la versione finale del modello è stato utilizzato il Wiedermann 74, ma per la categoria “reattiva” tale modello è stato leggermente modificato, per differenziare il comportamento delle due categorie di traffico simulate. Si riportano per completezza le figure 44 e 45, rappresentanti i parametri del modello di cambio corsia di entrambe le categorie.

Driving Behavior ? X

No.:  Name:

Following Car following model Lane Change Lateral Signal Control Autonomous Driving Driver Errors

General behavior:

Necessary lane change (route)

	Own	Trailing vehicle
Maximum deceleration:	<input type="text" value="-6,00 m/s&lt;sup&gt;2&lt;/sup&gt;"/>	<input type="text" value="-4,00 m/s&lt;sup&gt;2&lt;/sup&gt;"/>
- 1 m/s <sup>2</sup> per distance:	<input type="text" value="50,00"/> m	<input type="text" value="50,00"/> m
Accepted deceleration:	<input type="text" value="-1,00 m/s&lt;sup&gt;2&lt;/sup&gt;"/>	<input type="text" value="-1,00 m/s&lt;sup&gt;2&lt;/sup&gt;"/>

Waiting time before diffusion:   Overtake reduced speed areas

Min. clearance (front/rear):   Advanced merging

To slower lane if collision time is above:   Vehicle routing decisions look ahead

Safety distance reduction factor:

Maximum deceleration for cooperative braking:

Cooperative lane change

Maximum speed difference:

Maximum collision time:

Rear correction of lateral position

Maximum speed:

Active during time period from  until  after lane change start

figura 44 parametri di lane change, categoria Urbano motorizzato

Driving Behavior ? X

No.:  Name:

Following Car following model Lane Change Lateral Signal Control Autonomous Driving Driver Errors

General behavior:

Necessary lane change (route)

	Own	Trailing vehicle
Maximum deceleration:	<input type="text" value="-4,00 m/s&lt;sup&gt;2&lt;/sup&gt;"/>	<input type="text" value="-3,00 m/s&lt;sup&gt;2&lt;/sup&gt;"/>
- 1 m/s <sup>2</sup> per distance:	<input type="text" value="100,00"/> m	<input type="text" value="100,00"/> m
Accepted deceleration:	<input type="text" value="-1,00 m/s&lt;sup&gt;2&lt;/sup&gt;"/>	<input type="text" value="-1,00 m/s&lt;sup&gt;2&lt;/sup&gt;"/>

Waiting time before diffusion:   Overtake reduced speed areas

Min. clearance (front/rear):   Advanced merging

To slower lane if collision time is above:   Vehicle routing decisions look ahead

Safety distance reduction factor:

Maximum deceleration for cooperative braking:

Cooperative lane change

Maximum speed difference:

Maximum collision time:

Rear correction of lateral position

Maximum speed:

Active during time period from  until  after lane change start

figura 45 parametri di lane change, categoria Urbano reattivo motorizzato

Nell'ultima versione è stato inoltre inserito un valore fisso di "lane change distance", che parallelamente al modello di Wiedermann 74, crea un valore di distanza preferenziale per il cambio corsia dei veicoli. Questa proprietà è direttamente associata al link, e forza i veicoli ad effettuare la manovra, avendo un peso specifico maggiore nel forzare tale decisione rispetto ai parametri del modello di "lane changing". In alcune sezioni si è ritenuto opportuno inserire un valore maggiore per tale distanza rispetto a quello di default pari a 200 metri: in questo modo i veicoli tendono ad effettuare la manovra di cambio corsia con largo anticipo rispetto alle svolte e alle sezioni con linea di arresto o semaforizzate. Questo nuovamente è legato all'ipotesi che nel caso in esame la maggioranza degli utenti sia familiare rispetto alla rete in oggetto, e quindi conosca la propria destinazione e il percorso da effettuare.

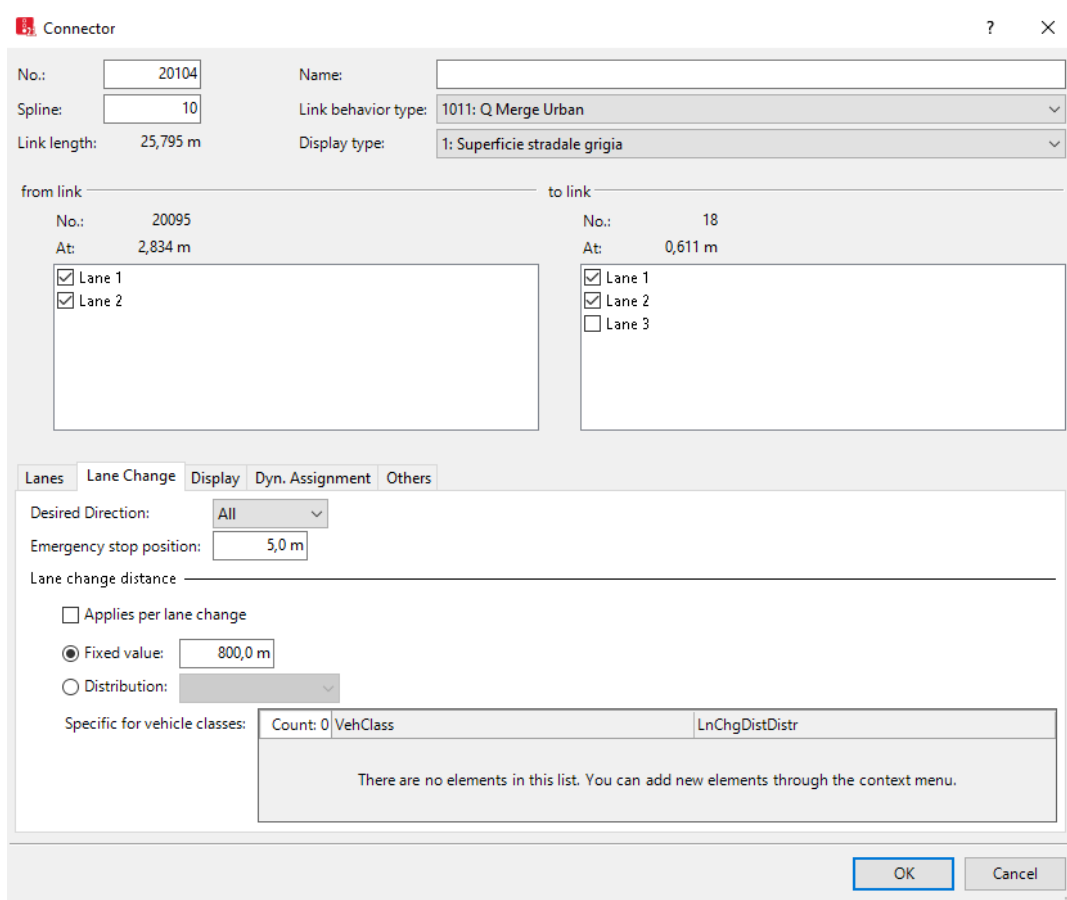
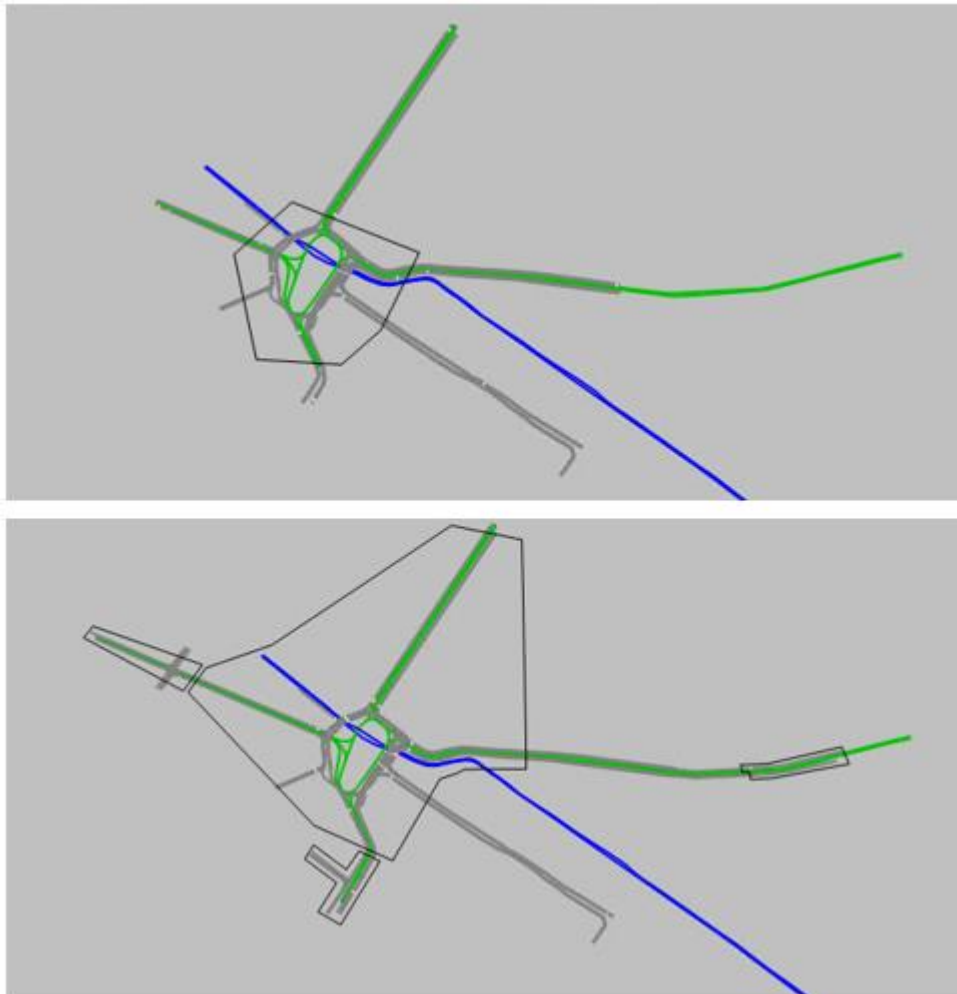


figura 46 parametri di lane change associati al link di collegamento

#### 4.1.3.4 Espansione del modello

L'ultima differenza che caratterizza il modello V3 è l'ampliamento del modello stesso: tre intersezioni adiacenti al nodo di Porta Maggiore, che in origine non erano state considerate, sono state incluse. Queste ultime sono l'intersezione di Via Prenestina - Deposito Atac, la Piazza di Santa Croce in Gerusalemme e l'intersezione di Via di Porta Maggiore con Viale Manzoni. Sono state incluse con lo scopo di modellare una generazione dei flussi più simile al reale deflusso; infatti, questi tre nodi e

la loro gestione semaforica permettono di generare i veicoli che proseguono verso il nodo di Porta Maggiore secondo plotoni più regolari, generati dalle fasi di verde nelle intersezioni in oggetto. Nelle immagini seguenti si apprezza l'estensione del modello rispetto alla prima versione.



*figura 47 espansione del modello con inclusione delle intersezioni adiacenti*

## **4.2 Simulazioni in ambiente Vissim: picco mattutino**

Per effettuare un'analisi completa ed esaustiva, il solo picco mattutino è stato considerato. Tale scelta è stata effettuata in accordo con RSM, rivelandosi questo flusso il più critico del giorno tipo feriale.

### **4.2.1 Parametri di simulazione costanti**

Per la simulazione le variabili che devono rimanere una costante per effettuare un confronto ed analizzare le strategie sono molteplici. La principale tra tutte le grandezze che devono rimanere costanti è la domanda di mobilità. In ambiente di simulazione verrà pertanto caricata una matrice di generazione con le manovre di svolta che rappresentano la matrice O/D del picco mattutino rilevato. Le matrici sono state descritte e riportate nel capitolo "4.1.2.3 Scenario 1: flusso di picco mattutino".

Rimangono costanti anche i parametri della simulazione vera e propria, riportati nella seguente immagine:

The image shows a software dialog box titled "Simulation parameters" with a "Meso" tab selected. The dialog contains several input fields and checkboxes. The "Comment" field is empty. The "Period" is set to 4200 s. The "Start time" is 07:50:00 and the "Start date" is 05/07/2021. The "Simulation resolution" is 10 and the "Random Seed" is 42. The "Number of runs" is 5, "Random seed increment" is 5, and "Dynamic assignment volume increment" is 0,00 %. The "Simulation speed" is set to "Factor" with a value of 2,0. There are checkboxes for "Retrospective synchronization" (unchecked) and "Break at" (unchecked, with a value of 0 s). The "Number of cores" is set to "use all cores". At the bottom, there are "OK" and "Cancel" buttons.

*figura 48 parametri di simulazione*

Il parametro di “random seed” in particolare permette di inserire tra le diverse simulazioni una diversa distribuzione del traffico di cui le matrici di generazione rappresentano il valore medio di flusso orario da generare nel link corrispondente. Sono state effettuate per ogni scenario cinque simulazioni della durata di un’ora, caricando a vuoto il modello per un intervallo di 10 minuti (600 secondi) e considerando i risultati delle simulazioni nell’ora seguente (600-4200 secondi).

#### **4.2.2 Parametri di simulazione variabili**

Per analizzare diverse strategie confrontando a valle i risultati ottenuti rispetto allo scenario dello Stato di fatto, si modificheranno alcune variabili. La principale sarà la configurazione dei piani semaforici. I piani a ciclo e fasi di durata fissa verranno infatti modificati negli scenari studiati affinché si raggiunga un deflusso migliore rispetto a quello originale.



## **5 Scenari di traffico simulati**

Il modello di simulazione utilizzato è il modello finale, versione V3, nel quale verranno mantenute costanti la domanda di mobilità e le caratteristiche geometriche delle arterie e delle intersezioni modellate. Per costituire uno scenario di base, indicato come Scenario 1, si inseriscono i piani dei controllori descritti nei capitoli di descrizione dello Stato di Fatto, che rappresentano l'attuale gestione implementata nel nodo.

I risultati delle simulazioni di questo scenario base rappresenteranno la configurazione che RSM attua per il nodo di Porta Maggiore, alla quale si farà riferimento nelle analisi successive, con l'obiettivo di individuare strategie migliorative. Le analisi successive verranno effettuate configurando ulteriori scenari per migliorare le performance, considerando la massimizzazione della capacità e il miglioramento delle condizioni di deflusso come obiettivi primari.

### **5.1.1 Scenario 1 – Stato di Fatto**

Lo Stato di Fatto è uno scenario dove il concetto di coordinazione per attuare l'onda verde non è considerato, essendo i cicli semaforici di durata differente per le intersezioni che costituiscono il nodo. Per tale motivo il deflusso non è ben regolato e le code non si presentano costanti per cicli semaforici successivi. Nel nodo, per tale motivo, la condizione diverge rapidamente da una condizione sotto-satura ad una condizione congestionata, con accessi semaforizzati in saturazione. Ad esclusione della prima decina di minuti di simulazione, ovvero il tempo di carico della domanda, le code crescono e raggiungono lunghezze notevoli.

Si riportano a seguire le principali grandezze che risultano dalle simulazioni di questo primo scenario.

#### **5.1.1.1 Risultati Scenario 1**

Per valutare gli scenari sono state prese in considerazione le principali variabili del traffico, descritte a seguire. In Vissim le variabili vengono misurate in generale sull'intera rete, sui nodi definiti, sui link, oppure definendo alcuni "Data Collection Points", ovvero simulando un sistema di monitoraggio completo costituito da dispositivi quali rilevatori di velocità, contatori della coda e contatori dei passaggi (spire di conteggio).

La tabella 7 presenta i risultati come media delle cinque simulazioni sui veicoli rilevati dai contatori posti nelle sezioni di accesso al nodo di Porta Maggiore dalle arterie indicate nella colonna "Via di Accesso".

Contatori di veicoli	Veicoli rilevati (veh)		Via di Accesso	domanda servita (veh)	domanda generata (veh)	rapporto
Accesso Via dello Scalo 1	409		Via Scalo S. Lorenzo	1061	1442	74%
Accesso Via dello Scalo 2	652					
Accesso Via Prenestina 1	468		Via Prenestina	1188	1213	98%
Accesso Via Prenestina 2	720					
Accesso Via Casilina 1	242		Via Casilina	707	854	83%
Accesso Via Casilina 2	465					
Accesso Via Eleniana 1	537		Via Eleniana	1083	1069	101%
Accesso Via Eleniana 2	546					
Accesso Via Porta Maggiore	178		Via Porta Maggiore	178	184	97%

Tabella 7 veicoli rilevati in ingresso al nodo, Scenario 1

Viene indicata anche la percentuale della domanda servita rispetto ai veicoli generati nell'ora di simulazione. La domanda non rilevata rappresenta le correnti veicolari che alla fine dell'ora di simulazione rimangono all'esterno del modello o in coda a monte dei rilevatori lungo le vie di accesso al nodo. In questo secondo caso sono quindi veicoli che partecipano al fenomeno di coda. Per discretizzare tra i veicoli non simulati e quelli presenti in coda occorre considerare le informazioni relative al modello in generale. Al termine di ogni simulazione viene infatti indicato il numero di veicoli non simulati e la via di accesso alla quale tali veicoli appartengono. Nel caso delle cinque simulazioni dello Scenario 1, i veicoli non simulati sono presenti in sole due vie di accesso, via dello Scalo San Lorenzo, che risulta l'unica sprovvista di regolazione semaforica, e Via Casilina. Per i restanti accessi i veicoli "non serviti" risultano in coda all'istante di fine simulazione. Nella tabella 8 seguente è riportata la situazione delle due arterie citate, dove abbiamo una parte di veicoli in coda e una parte di veicoli che non hanno potuto accedere alla rete del modello di simulazione, a causa della coda presente.

Via di Accesso	Veicoli simulati (veh)	Veicoli non simulati (veh)	domanda servita (veh)	Veicoli in coda (veh)
Via Scalo San Lorenzo	1108	334	1061	47
Via Casilina	783	71	707	77

Tabella 8 analisi dei veicoli, Via Scalo S. Lorenzo e Via Casilina, Scenario 1

La tabella 9 contiene i risultati dell'intera rete modellata. Non permette pertanto di evidenziare le parti del nodo congestionate e quelle dove il deflusso sia qualitativamente migliore.

S1	Ritardo per veicolo	numero di fermate	velocità media	ritardo per fermata	Veicoli simulati	Veicoli a destinazione	Veicoli non simulati
	(s/veh)	(-)	(km/h)	(s)	(-)	(-)	(-)
MEDIA	236,59	8,11	12,57	170,47	4703	4267	380
DEV. STD.	24,40	0,76	1,05	20,25	82	59	93
MIN	199,04	6,92	11,48	140,05	4573	4170	280
MAX	264,78	9,00	14,24	193,01	4787	4331	532

Tabella 9 parametri del traffico misurati a livello di intera rete, Scenario 1

La seguente tabella 10 analizza i risultati relativi alle code. Nella colonna "Contatore della coda" si indica il numero del link del modello di simulazione e la Via corrispondente dove il contatore è posizionato.

Contatore della coda	Lunghezza media (m)	Lunghezza max (m)	Fermate nella coda medie (-)
3: Via Prenestina	69,63	236,14	1174
1: Via dello scallo San Lorenzo	436,03	491,97	8578
23: Via di Porta Maggiore	16,12	74,50	161
6: Piazzale Porta Maggiore	45,88	209,36	863
7: Piazzale Porta Maggiore	19,92	188,63	336
8: Piazzale Porta Maggiore	537,16	657,65	5422
20070: Via Prenestina	10,93	162,69	431
20074: Via Eleniana	12,72	62,19	578
20049: Via di Porta Maggiore	15,17	64,58	170

Tabella 10 lunghezza delle code, Scenario 1

Dal dato relativo alla coda si evince un'informazione complementare alla tabella 7 relativa ai veicoli simulati. Presso Via dello Scallo san Lorenzo e Via Casilina, che confluisce nel breve tratto denominato "8: Piazzale\_Porta Maggiore", la coda caratterizza praticamente il 90% della lunghezza del link stesso. Questa situazione di traffico congestionato blocca i veicoli in arrivo che non hanno la possibilità di accedere alla rete modellata.

Per ottenere un'indicazione puntuale del ritardo e del tempo di viaggio sono stati utilizzati i contatori di tempo di viaggio, denominati in ambiente Vissim come "Vehicle travel time collectors", configurando la coppia di contatori di inizio e fine per ottenere i tempi di viaggio medi tra le principali sezioni del nodo. Si distinguono dei segmenti maggiori, che descrivono il viaggio da una via di accesso ad una di uscita, descrivendo quindi il tempo per l'attraversamento del nodo verso tale direzione, e i segmenti minori, che rappresentano porzioni del segmento maggiore. Le sezioni così ottenute descrivono la totalità degli spostamenti nel nodo. La tabella con i risultati delle simulazioni completa è presente nell'Appendice B. Le informazioni relative alle vie di Accesso sono riassunte nella seguente tabella 11, dove si indica il ritardo medio misurato a partire dal tempo di viaggio a vuoto, ovvero il tempo di viaggio che un singolo veicolo avrebbe percorrendo la distanza ad una velocità massima di 45 km/h.

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)
Via Prenestina	79	63	16
Via Casilina	581	51	530
Via Eleniana	43	26	17
Via dello Scalo San Lorenzo	349	39	310
Via di porta Maggiore	33	31	2

Tabella 11 ritardo relativo alle singole vie di accesso, Scenario 1

Per ottenere indicazioni sulle emissioni ed il consumo di carburante è stato analizzato il nodo nella sua interezza. Il dato per l'intera area del nodo è presentato in tabella.

Nodo	Veicoli (Veh)	CO (g)	NOX (g)	VOC (g)	Consumo (litri)
13002: Piazzale Labicano-Porta Maggiore	4703	27859	5420	6457	1507

Tabella 12 emissioni e consumi nel nodo, Scenario 1

### 5.1.1.2 Analisi Scenario 1

Dai risultati ottenuti e presentati nel capitolo precedente risulta evidente che le prestazioni del nodo sono in particolare influenzate dalla condizione di Via Casilina e di Via dello Scalo San Lorenzo.

Via Casilina si collega al nodo di Piazzale Labicano ed è regolata dal gruppo segnale SG8, il cui schema delle fasi è riportato in figura 49.



figura 49 gruppo segnale SG8, Piazzale Labicano

La durata del ciclo è pari a 123 secondi, con una durata del verde di 18 secondi. La domanda di traffico generata è di 854 veicoli, di cui 71 non entrano in simulazione e 77 veicoli rimangono in coda al termine della simulazione. I veicoli che attraversano la linea di arresto presso Piazzale Labicano sono 783. In condizioni comuni, una corrente di veicoli attestati presso la linea di arresto in condizioni sature è caratterizzata da una frequenza di passaggio pari a circa due secondi durante la fase di verde. Tale intervallo è denominato anche Headway e permette di calcolare la portata di saturazione di un movimento all'interno dell'intersezione, a partire dalla durata delle sue fasi, considerando la durata del ciclo e derivando il numero dei cicli in un'ora.

Partendo da tali dati noti, riportati in tabella 13, nella successiva tabella 14 è riportato il numero di veicoli che potenzialmente secondo le condizioni comuni potrebbero essere serviti.

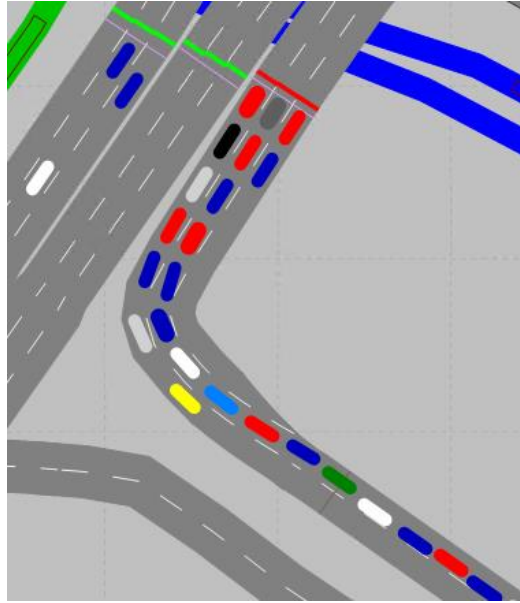
Gap (s)	durata fase verde (s)	corsie (-)	Durata ciclo (s)	Numero cicli (-) in un'ora
2	18	3	123	29

Tabella 13 valori del ciclo semaforico per Via Casilina (SG8)

capacità oraria (veh/h)	domanda (veh)	Veicoli rimanenti
783	854	71

Tabella 14 confronto tra capacità e domanda, Via Casilina (SG8)

Si evince che la durata del verde è insufficiente per servire la domanda veicolare. Inoltre, dalla tabella 8 che riporta il numero dei veicoli dello Scenario 1, i veicoli che non attraversano la linea di arresto sono circa 180, per cui la portata di saturazione è minore di quella teorica. La portata di saturazione teorica di 1800 veicoli/h per singola corsia si riduce nel caso del traffico con regolazione semaforica perché la frequenza viene influenzata dalla geometria del link di accesso, dal numero variabile di corsie lungo l'arteria a monte della linea di arresto, che passa da due a tre corsie, e dagli aspetti comportamentali dei guidatori come il modello di cambio corsia e il tempo di percezione e reazione all'apertura della fase di verde. Nella simulazione i veicoli non sempre si assestano correttamente sulle tre corsie di accesso al nodo e questo è ulteriore fonte di riduzione della portata di saturazione (figura 50).



*figura 50 attestamento sulle corsie presso la linea di arresto, Via Casilina*

Stimando il valore di portata di saturazione nello scenario simulato, a partire dal numero di veicoli che attraversano la linea di arresto, si ottiene una portata di saturazione di circa 1560 veicoli/h. Con questo valore si calcola la durata del verde necessario a servire il 100% della domanda. I risultati sono esposti in tabella 15.

portata di saturazione oraria (veh/h)	durata fase verde (s)	corsie (-)	Durata ciclo (s)	Numero cicli (-) in un'ora
1600	22	3	123	29

*Tabella 15 valori del ciclo derivati dalla reale portata di saturazione, Via Casilina*

Occorre quindi, per un ciclo di 123 secondi, estendere il verde di 4 secondi, riducendo le fasi conflittuali degli altri gruppi segnali. Per un ciclo di 150 secondi occorrono 26 secondi di verde per servire i veicoli che accedono da Via Casilina. Il ciclo da 150 secondi conterrà pertanto questa modifica. Si è garantita tale estensione del verde riducendo le fasi dei gruppi segnale SG3, SG5 ed SG9.

Per quanto riguarda Via dello Scalo San Lorenzo, non essendo presente alcuna regolazione semaforica, non si può agire direttamente per modificare la portata di saturazione. Infatti, il numero di veicoli che accedono al nodo da questo accesso dipende fortemente dai veicoli in arrivo da piazzale Labicano e dalla propagazione delle code formate dai veicoli in attesa alla linea di arresto presso Piazza di Porta Maggiore. Ipotizzando che la corrente da Via dello Scalo San Lorenzo sia la sola arteria con domanda non nulla, ovvero che la fase di verde del SG1 di Piazza di Porta Maggiore sia dedicato alla sola corrente in esame, si può effettuare la medesima analisi fatta in precedenza per Via Casilina.

Gap (s)	durata fase verde (s)	corsie (-)	Durata ciclo (s)	Numero cicli (-) in un'ora
2	102	2	153	23

Tabella 16 valori del ciclo semaforico (SG1 Piazza Porta Maggiore) per Via dello Scalo San Lorenzo

capacità oraria (veh/h)	domanda (veh)	Veicoli rimanenti
2346	1442	0

Tabella 17 confronto tra capacità e domanda, Via dello Scalo San Lorenzo

Come si evince nelle tabelle, la durata del verde in questo caso semplificato risulterebbe sufficiente a soddisfare la domanda. Tale ipotesi semplificativa è però irrealizzabile.

### 5.1.2 Scenario 2 – Coordinazione tra Gruppi Segnale

Lo Scenario 2 si compone a sua volta di 3 scenari, dove in dettaglio vengono analizzate e risolte alcune problematiche rilevate negli scenari precedenti. In tutti è mantenuta la nuova durata del verde per risolvere il problema di limitata portata di saturazione in Via Casilina. Il confronto tra i risultati dei successivi scenari sarà descritto nel capitolo Analisi dei risultati, successivo ai capitoli di descrizione degli scenari.

#### 5.1.2.1 Scenario 2.1 – Coordinazione tra Gruppi Segnale ad inizio ciclo

Lo Scenario 2.1 ha l'obiettivo di analizzare l'impatto della coordinazione e della nuova durata della fase di verde del SG8 di Piazzale Labicano sul deflusso del traffico veicolare nel nodo, con l'implementazione del ciclo di durata 75 secondi o multiplo di esso (150 secondi), in particolare appunto modificando la fase SG8 di Piazzale Labicano per risolvere il problema derivato dall'insufficiente capacità, evidenziato nel capitolo precedente.

A tal proposito il piano da 150 secondi di Piazzale Labicano considera le nuove durate delle fasi, con il vincolo minimo di 26 secondi di verde per la fase corrispondente all'interno del gruppo segnale SG8 (si è imposta di durata 27 secondi).

Gli offset sono calibrati con uno scenario di prova a domanda diminuita dell'80%, in modo da avere una ideale situazione di deflusso con velocità pari alla massima consentita.

La presenza di una domanda elevata, che crea congestione dopo pochi cicli semaforici, impatta negativamente la coordinazione poiché si assiste alla formazione di code: i plotoni di veicoli che in teoria dovrebbero proseguire il proprio cammino senza fermarsi, sono costretti a rallentare e a volte ad arrestarsi in coda, accumulando ritardo.

Si descrivono a seguire le modifiche apportate ai piani semaforici per attuare la coordinazione.

#### **5.1.2.1.1 Coordinamento semaforico: modifiche apportate rispetto allo Stato di fatto**

Per facilitare la coordinazione si è deciso di utilizzare un valore di 150 secondi come massima durata del ciclo. I cicli brevi saranno quindi dei sottomultipli di 150 secondi, di durata pari a 75 secondi. Si sono considerati cicli da 150 secondi per le intersezioni principali di Piazza di Porta Maggiore e Piazzale Labicano, e di Viale Manzoni con Via di Porta Maggiore, che era originariamente caratterizzata da una durata originale del ciclo di 132 secondi. Le restanti intersezioni, Via Prenestina – Deposito Atac e Piazza di Santa Croce in Gerusalemme, sono caratterizzate da un ciclo di durata 75 secondi.

Quando la durata del ciclo risulta di 75 secondi, ovvero dimezzata rispetto ai piani principali, la coordinazione si potrà attuare a cicli alterni. Per coordinare i piani semaforici sono stati considerati i gruppi segnali corrispondenti alla medesima corrente di traffico, considerando due intersezioni per volta e ottenendo con un procedimento a cascata la coordinazione dell'intera rete. Come convenzione si è stabilito che il "Tempo zero", ovvero l'inizio della simulazione, coincida con il ciclo semaforico che inizia con un offset nullo: l'intersezione scelta è Piazzale Labicano.

La durata delle fasi con durata del ciclo modificata è stata calcolata con un approccio proporzionale, rispettando la coordinazione tra i gruppi segnali di una stessa intersezione. Sono mantenuti e laddove non presenti sono stati introdotti alcuni secondi di fase di tutto-rosso per permettere ai veicoli di liberare l'incrocio in sicurezza. La durata della fase di giallo è stata mantenuta inalterata rispetto ai piani originali.

Essendo le durate delle fasi differenti, si analizzerà quale percentuale di coordinazione occorre garantire per raggiungere gli obiettivi preposti. La percentuale di coordinazione considererà la percentuale di verde che funziona secondo un meccanismo di onda verde dall'intersezione a monte verso quella a valle. Quando si parla invece di corridoio, la coordinazione sarà valutata come il minore valore di verde per cui la coordinazione è garantita a tutto il corridoio, rapportato al ciclo (in percentuale). In Appendice B, nel capitolo dedicato al calcolo degli offset, è descritto in dettaglio il calcolo della percentuale di coordinazione.

### 5.1.2.1.1 Corridoio Prenestina-Labicano-Porta Maggiore

La corrente di traffico che attraversa il nodo passando attraverso Piazzale Labicano segue la seguente successione di gruppi segnale:

Intersezione 1	SG	Intersezione 2	SG	Intersezione 3	SG
Via Prenestina - Deposito ATAC	2	Piazzale Labicano	3	Piazza Porta Maggiore	1

Tabella 18 gruppi segnali successivi, Corridoio Prenestina-Piazza di Porta Maggiore

Rappresentata nella seguente figura 51:



figura 51 schema corridoio Prenestina-Piazza di Porta Maggiore

La coordinazione ha origine dall'intersezione di Prenestina- Deposito Atac. In questa intersezione da un ciclo originale di 86 secondi si è passati ad un ciclo di 75 secondi. Le fasi di verde si riducono di 10 secondi, da 61 a 50 secondi, mentre le altre fasi vengono preservate riducendo il rosso di solamente un secondo, essendo calcolato per permettere l'attraversamento pedonale. Nelle figure 52-53 si può osservare il nuovo ciclo a confronto con l'originale:

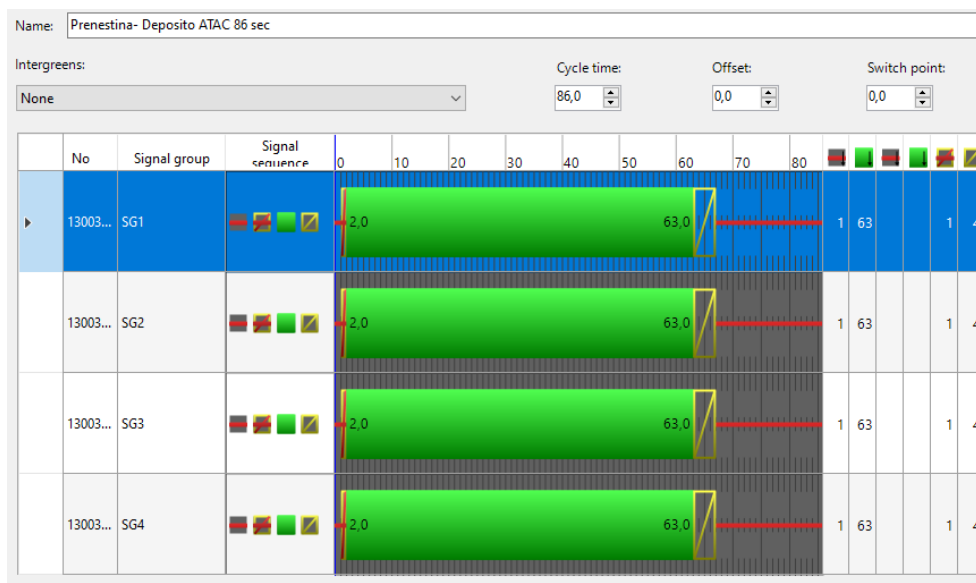


figura 52 piano semaforico originale di durata 86 secondi, Via Prenestina-deposito ATAC



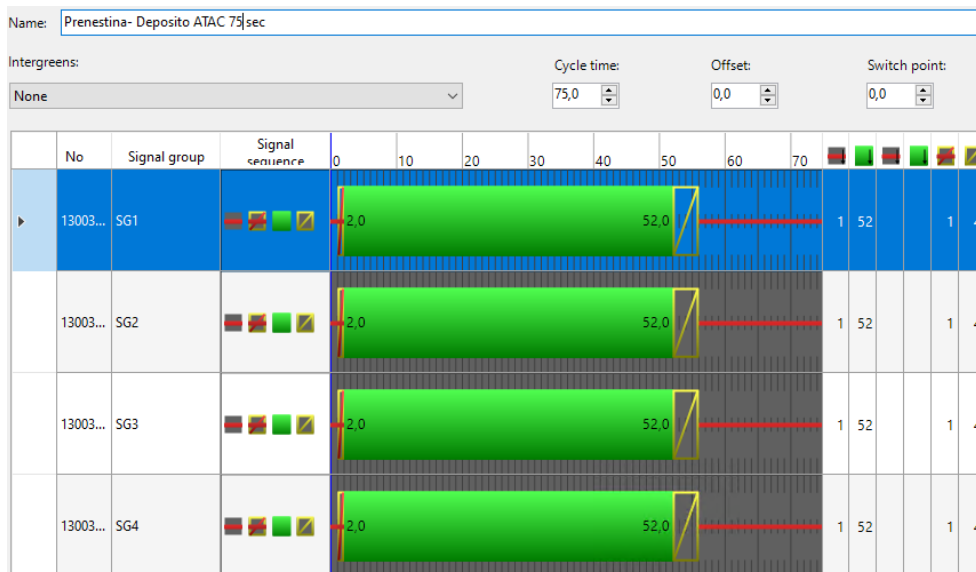


figura 53 piano semaforico di durata 75 secondi, Via Prenestina-deposito ATAC

I gruppi segnale di questa prima intersezione dovranno coordinarsi con il gruppo segnale SG 3 di Piazzale Labicano. Quest'ultimo ha un ciclo con durata originale pari a 123 secondi che, modificato, assume una durata di 150 secondi (figure 54-55)

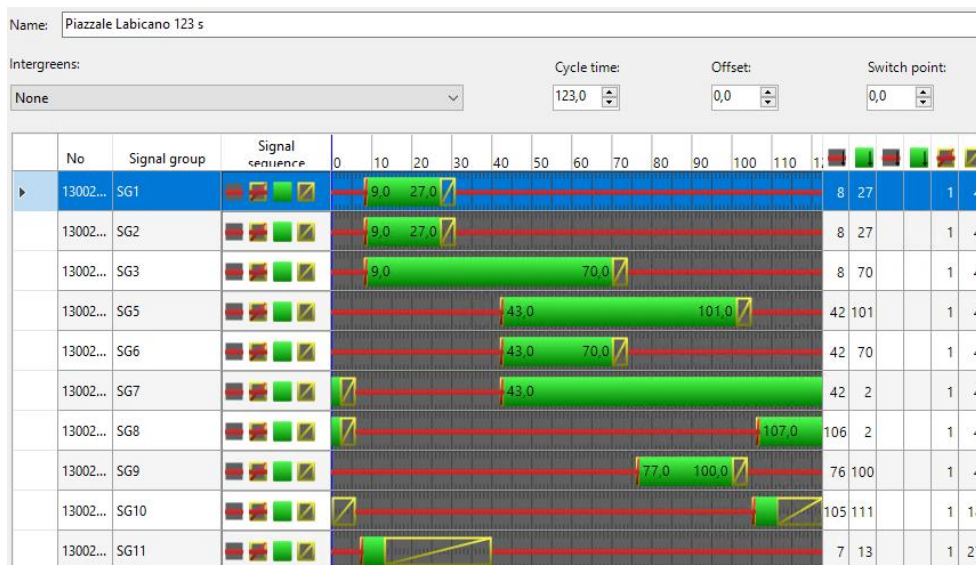


figura 54 piano semaforico originale di durata 150 secondi, Piazzale Labicano SG3

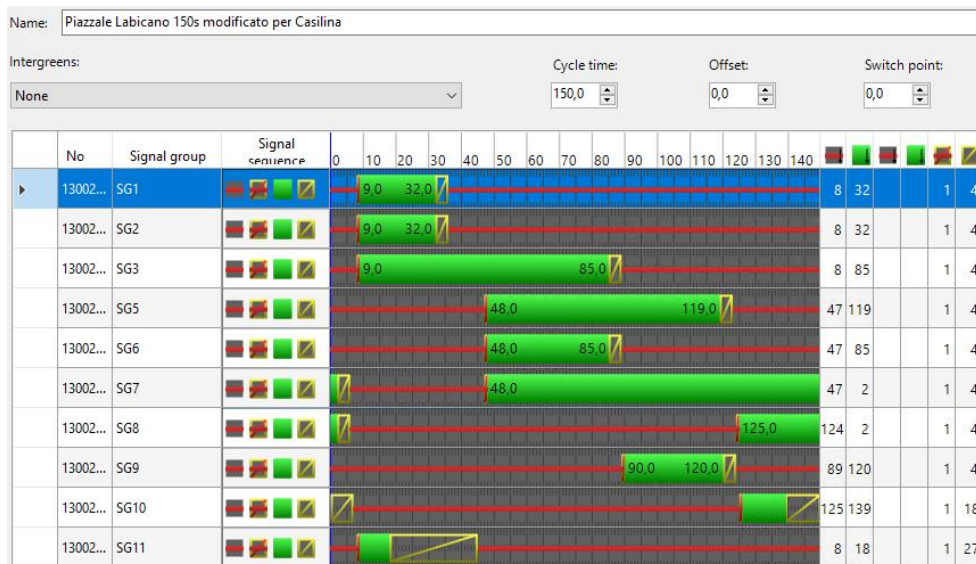


figura 55 piano semaforico modificato di durata 150 secondi, Piazzale Labicano SG3

La fase di verde del SG 3 è preceduta da 8 secondi di fase rossa, che deve essere considerata per il calcolo della coordinazione. La distanza tra le sezioni semaforizzate è di 787 metri circa. È stata introdotta nel gruppo segnale SG8 una durata del verde che garantisca la massimizzazione della capacità.

Per quanto concerne la terza intersezione semaforizzata che la corrente di traffico proveniente da Via Prenestina incontra, ovvero Piazza di porta Maggiore, la modifica al piano è minima passando da un ciclo di 153 secondi ad uno di durata pari a 150 secondi. Per la coordinazione con Piazzale Labicano SG 3, va considerato il gruppo segnale di Piazza di Porta Maggiore SG 1. Nelle figure 56 e 57 seguenti sono riportate le modifiche al piano semaforico.

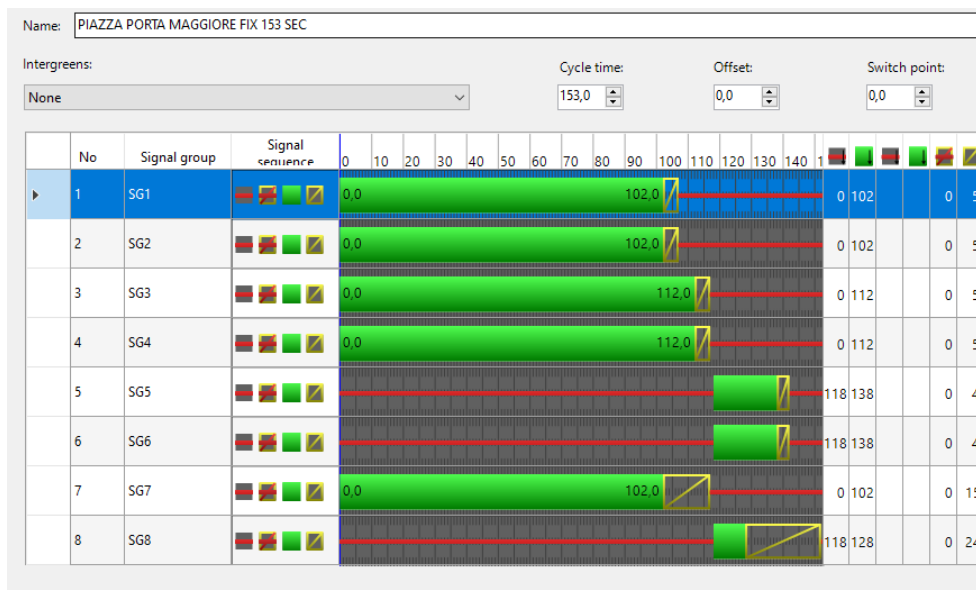


figura 56 piano semaforico originale durata 153 secondi, Piazza di Porta Maggiore

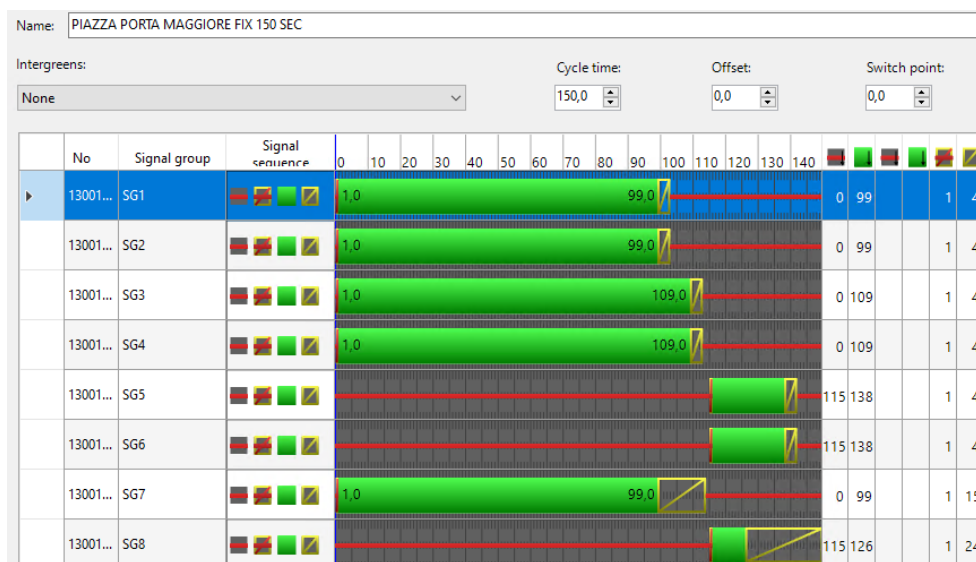


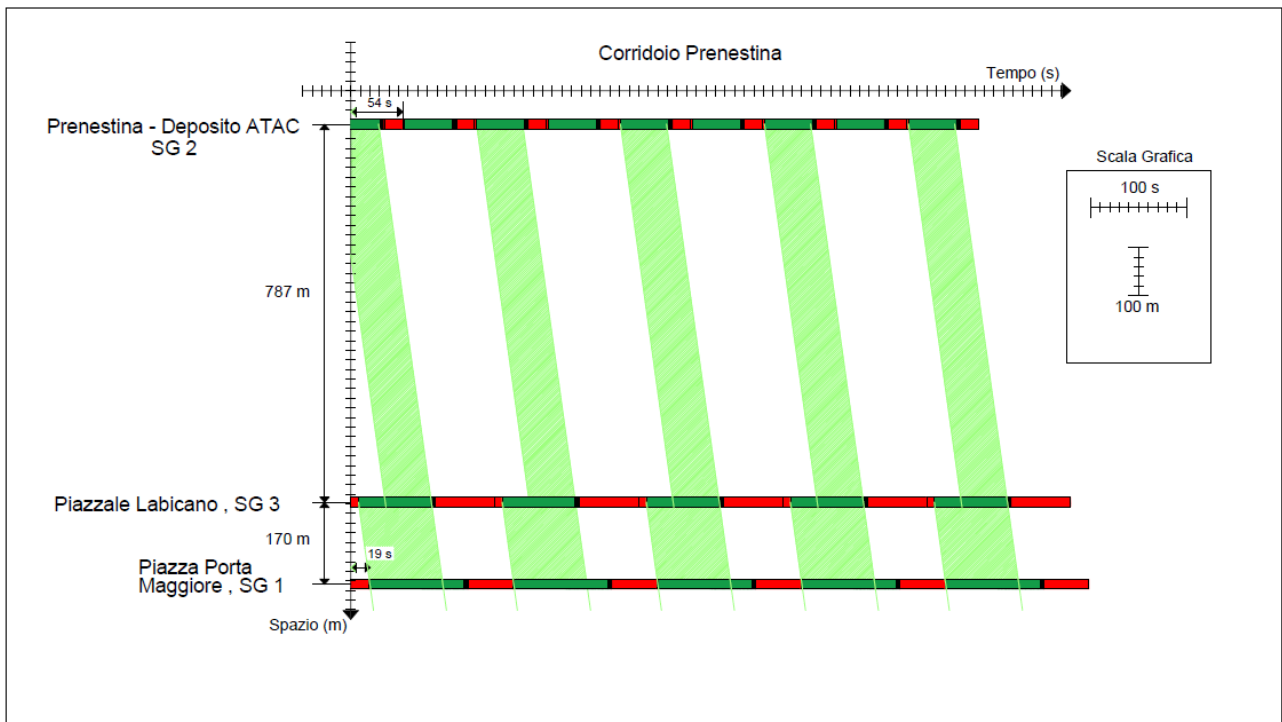
figura 57 piano semaforico modificato durata 150 secondi, Piazza di Porta Maggiore

Le distanze tra le sezioni semaforizzate sono note. La velocità limite come detto in precedenza è di 45 km/h per cui il tempo di offset è calcolabile facilmente con semplici equazioni cinematiche. Gli offset ottenuti sono riportati nella tabella 19 seguente. L'offset reale è ottenuto dal modello calibrato considerando Piazzale Labicano con offset fisso a zero. I calcoli e i dettagli sono riportati in Appendice B.

Corridoio Prenestina	Distanza (m)	Velocità (km/h)	OFFSET BASE (s)	OFFSET CALIBRATO (s)	OFFSET REALE (s)
Prenestina Atac- P. Labicano	787	45	63	65	54
P. Labicano - Piazza Porta Maggiore	170	45	14	15	19

Tabella 19 offset corridoio Prenestina-Piazza di Porta Maggiore

La metodologia più comune per rappresentare la coordinazione è attraverso il diagramma tempo-spazio, definito anche diagramma t-x. Si riportano a seguire i diagrammi t-x per il corridoio considerato: sull'asse delle ascisse è posta la distanza in metri, sulle ordinate il tempo in secondi. Le rette oblique rappresentano la traiettoria nel tempo dei veicoli, con una inclinazione pari alla velocità imposta di 45 km/h (figura 58).



*figura 58 coordinazione con rappresentazione delle possibili onde verdi, corridoio Prenestina*

### 5.1.2.1.1.2 Corridoio Piazza S. Croce in Gerusalemme-Labicano-Porta Maggiore

La corrente di traffico che si origina da questa Piazza percorre Via Eleniana e accede a Piazzale Labicano, seguendo la successione di gruppi segnale riportata nella tabella 20 seguente:

Intersezione 1	SG	Intersezione 2	SG
Piazza S. Croce in Gerusalemme	1	Piazzale Labicano	5-9

Tabella 20 gruppi segnali successivi, Corridoio P. Santa Croce in Gerusalemme-Piazzale Labicano

La stessa è rappresentata nella seguente figura 59:



figura 59 schema Corridoio P. Santa Croce in Gerusalemme-Piazzale Labicano

La coordinazione ha origine dall'intersezione di Piazza Santa Croce in Gerusalemme. In questa intersezione da un ciclo originale di 83 secondi si è passati ad un ciclo di 75 secondi. Le fasi di verde si riducono di 9 secondi, da 40 a 31 secondi, mentre le altre fasi vengono preservate per permettere l'attraversamento pedonale. Nelle figure 60 e 61 si può osservare il nuovo ciclo a confronto con l'originale:

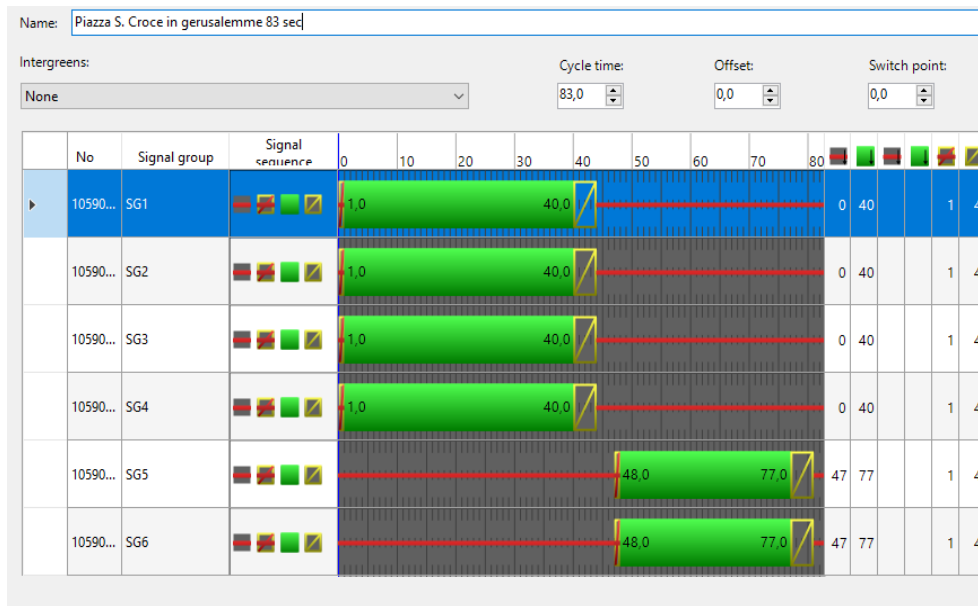


figura 60 piano semaforico originale di durata 83 secondi, Piazza Santa croce in Gerusalemme

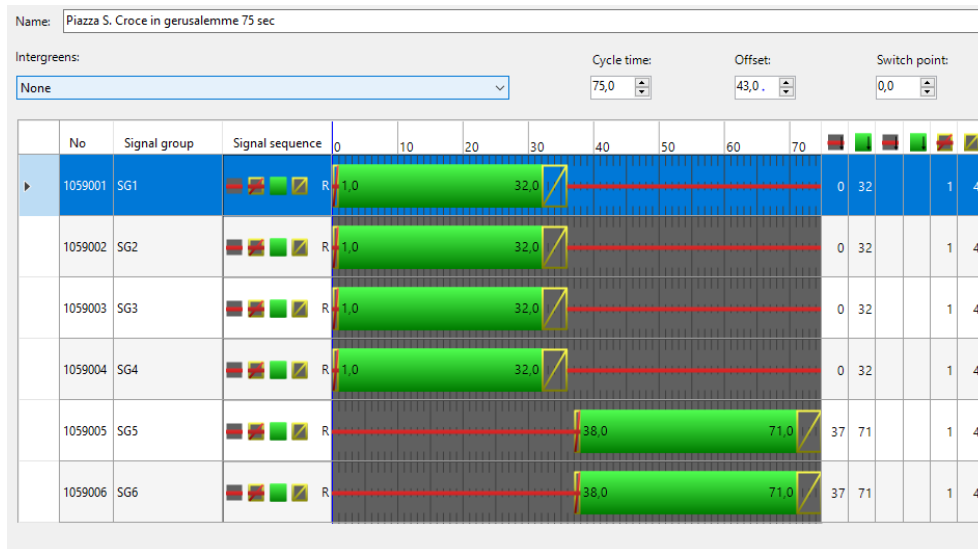


figura 61 piano semaforico modificato di durata 75 secondi, Piazza Santa croce in Gerusalemme

I gruppi segnale di questa prima intersezione dovranno coordinarsi con i gruppi segnale SG 5 ed SG 9 di Piazzale Labicano. Questi hanno un ciclo di durata originale 123 secondi che è portato ad una nuova durata pari a 150 secondi, ma hanno delle fasi di durata diversa, come si può osservare dalle seguenti figure 62-63.

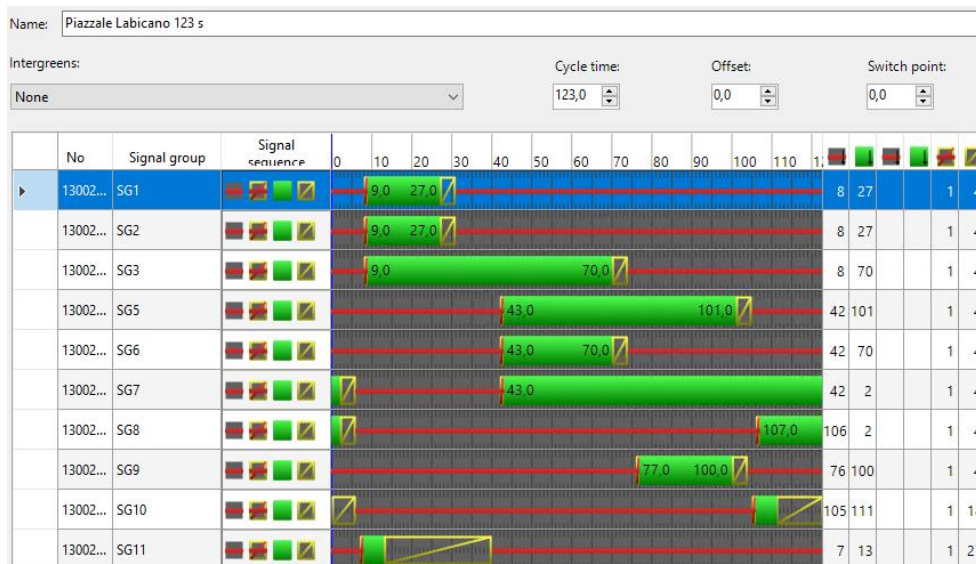


figura 62 piano semaforico originale di durata 123 secondi, Piazzale Labicano



figura 63 piano semaforico modificato di durata 150 secondi, Piazzale Labicano

La fase di verde del gruppo segnale SG 5 è preceduta da 47 secondi di fase rossa, che deve essere considerata per il calcolo della coordinazione. Il SG 9 ha invece un rosso di 89 secondi che precede la fase di verde di durata 30 secondi. Per la coordinazione sarà questo secondo gruppo segnale il più rilevante, essendo il flusso maggiore rispetto al flusso che effettua la svolta a destra in Via prenestina. La distanza tra le sezioni semaforizzate è di 330 metri circa.

Per quanto concerne la terza intersezione semaforizzata che la corrente di traffico proveniente da Via Eleniana incontra, ovvero Piazza di porta Maggiore, l'offset è il medesimo che garantisce la coordinazione da Via Prenestina. Dal diagramma tempo-spazio si evince che la coordinazione rimane del 100%.

La velocità limite è di 45 km/h per cui il tempo di offset base è calcolabile facilmente con il medesimo approccio utilizzato nel caso precedente.

Essendo noto l'offset di piazzale Labicano con Piazza di porta Maggiore per il Corridoio di Via Prenestina, l'offset del controllo di Piazza di Santa Croce viene calcolato a ritroso. Gli offset calibrati e reali ottenuti sono riportati nella tabella 21 seguente.

Corridoio Eleniana	Distanza (m)	Velocità (km/h)	OFFSET BASE (s)	OFFSET CALIBRATO (s)	OFFSET REALE (s)
P. S. Croce in Gerusalemme - Via Eleniana - P. Labicano	328	45	26	28	65
P. Labicano - Piazza Porta Maggiore	170	45	14	15	19

Tabella 21 offset Corridoio P. Santa Croce in Gerusalemme-Piazzale Labicano

Essendo la durata del ciclo di 75 secondi, la coordinazione avverrà a cicli alterni. Il diagramma tempo-spazio è riportato in Figura 64.

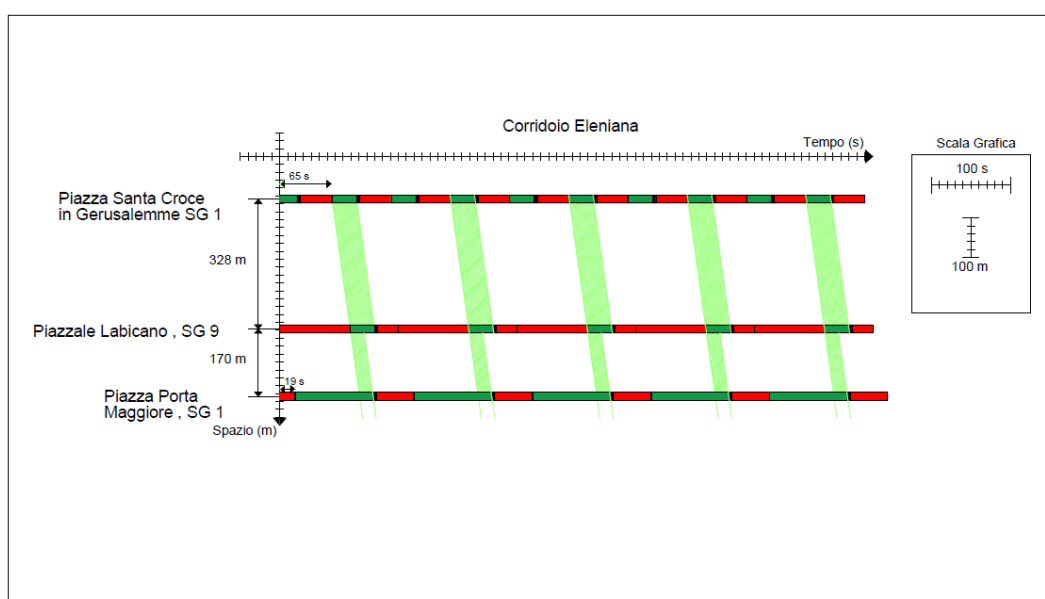


figura 64 coordinazione con rappresentazione delle possibili onde verdi, corridoio P. Santa Croce in Gerusalemme-Piazzale Labicano

Come si può osservare, per garantire la coordinazione per il corridoio di via Prenestina, la coordinazione del SG9 è ridotto a circa il 50%: la durata della fase di verde del SG1 di Piazza di Porta Maggiore è insufficiente a garantire entrambe le onde verdi.



### 5.1.2.1.1.3 Corridoio Via di Porta Maggiore-Piazza di Porta Maggiore

La corrente di traffico che si origina da questa intersezione di Viale Manzoni con Via di Porta Maggiore e che accede alla omonima Piazza è modesta in termini di domanda. Per completezza comunque viene coordinata anch'essa per garantire che i veicoli non formino code e abbiano un ritardo evitabile. La successione di gruppi segnale che interessa tale corrente è riportata nella tabella 22 seguente:

Intersezione 1	SG	Intersezione 2	SG
Viale Manzoni-Via P. Maggiore	4	Piazza P. Maggiore	6

Tabella 22 successione dei gruppi segnale, corridoio Via di Porta Maggiore

La stessa è rappresentata nella seguente figura 65:



figura 65 schema corridoio Via di Porta Maggiore

Il ciclo semaforico dell'intersezione di Viale Manzoni con Via di porta Maggiore è modificato in durata da 132 secondi a 150 secondi, mantenendo proporzionali le durate delle singole fasi. Nelle figure 66-67 seguenti si può osservare il nuovo ciclo a confronto con l'originale:

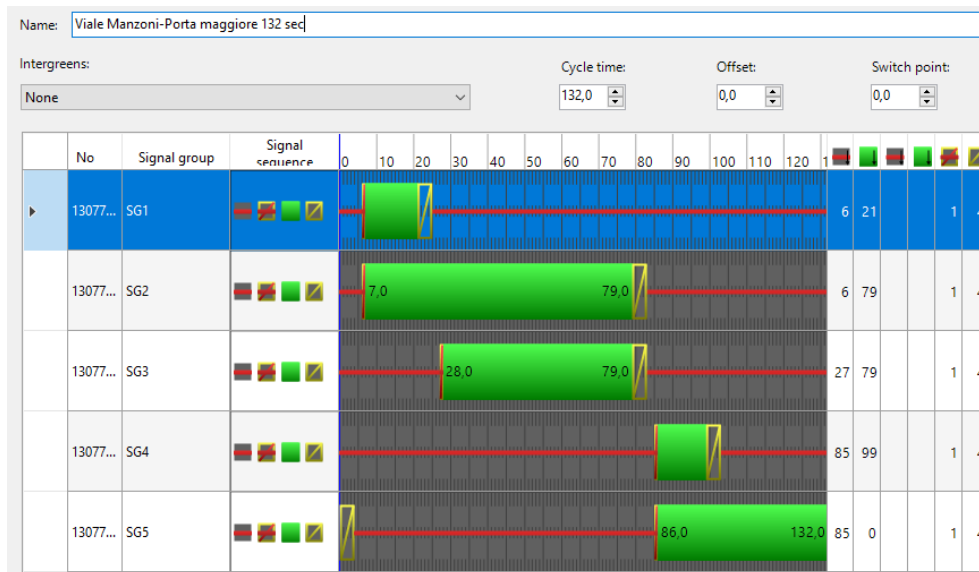


figura 66 piano semaforico originale durata 132 secondi, Viale Manzoni-via di Porta Maggiore

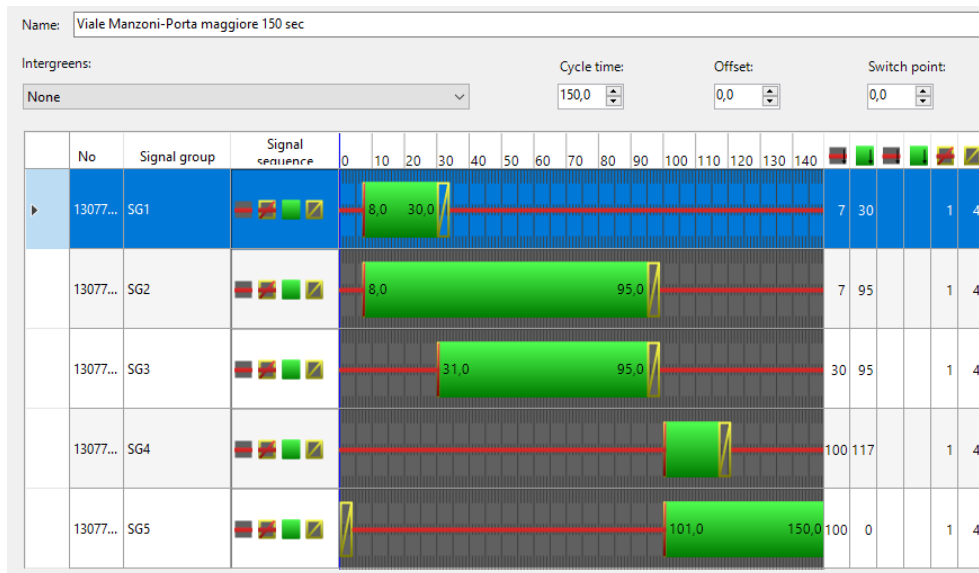


figura 67 piano semaforico modificato durata 150 secondi, Viale Manzoni-via di Porta Maggiore

Il gruppo segnale SG 4 di questa prima intersezione deve coordinarsi con il gruppo segnale SG 6 di Piazza di porta Maggiore, di cui si ripropone nella figura 68 seguente il diagramma delle fasi.

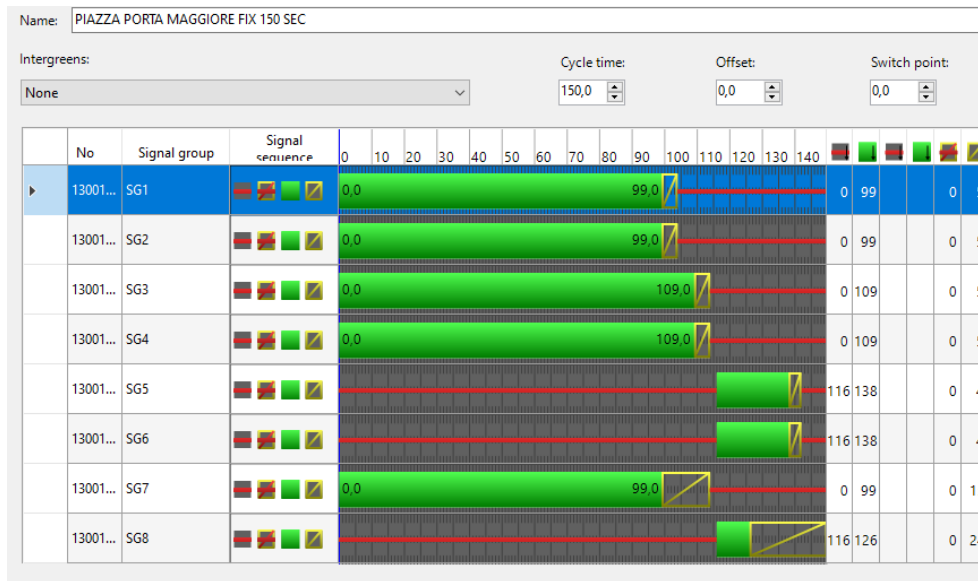


figura 68 piano semaforico modificato durata 150 secondi, Piazza di Porta Maggiore

La fase di verde del SG 6 è anticipata da 115 secondi di fase rossa, che deve essere considerata per il calcolo della coordinazione. La distanza tra le sezioni semaforizzate è di 380 metri circa. In questo caso l'offset di Piazza di Porta Maggiore è stato calcolato in precedenza per il Corridoio Prenestina: l'offset del controllo dell'intersezione Viale Manzoni-Via di Porta Maggiore va pertanto calcolato a ritroso. Gli offset ottenuti sono riportati nella tabella seguente.

Corridoio Via Porta Maggiore	Distanza (m)	Velocità (km/h)	OFFSET BASE (s)	OFFSET CALIBRATO (s)	OFFSET REALE (s)
Viale Manzoni-Via Porta Maggiore - P. Porta Maggiore	380	45	30	31	7

Tabella 23 offset corridoio via di Porta Maggiore

Il diagramma tempo-spazio è infine riportato in figura 69.

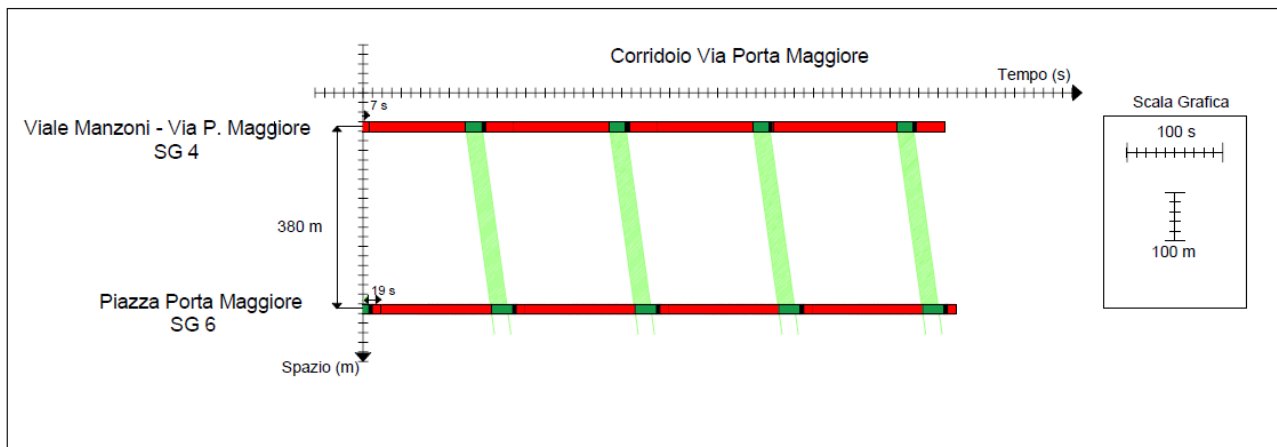


figura 69 coordinazione con rappresentazione delle possibili onde verdi, corridoio via di Porta Maggiore

### 5.1.2.1.2 Risultati Scenario 2.1

Per valutare gli scenari sono state prese in considerazione le medesime variabili del traffico considerate nello Scenario 1, per poterne effettuare successivamente un confronto. Pertanto, per le descrizioni relative alle seguenti tabelle si può fare riferimento alle descrizioni presenti nel capitolo Risultati Scenario 1, essendo riportate nel medesimo ordine.

Contatori di veicoli	Veicoli rilevati (veh)	Via di accesso	domanda servita (veh)	totale domanda generata (veh)	rapporto
Accesso Via dello Scalo 1	390	Via Scalo S. Lorenzo	1005	1442	70%
Accesso Via dello Scalo 2	615				
Accesso Via Prenestina 1	472	Via Prenestina	1183	1213	97%
Accesso Via Prenestina 2	710				
Accesso Via Casilina 1	265	Via Casilina	770	854	90%
Accesso Via Casilina 2	505				
Accesso Via Eleniana 1	532	Via Eleniana	1072	1069	100%
Accesso Via Eleniana 2	541				
Accesso Via Porta Maggiore	181	Via Porta Maggiore	181	184	99%

Tabella 24 veicoli rilevati in ingresso al nodo, Scenario 2.1

Rispetto allo Scenario 1 originale Via dello Scalo risulta più congestionata. Il deflusso peggiora a causa della coordinazione del Corridoio di Via Prenestina, a cui i veicoli provenienti da Scalo San Lorenzo devono garantire la precedenza. L'unico intervallo temporale che tali veicoli riescono a sfruttare per attraversare la sezione e portarsi in Piazza di porta Maggiore è quello corrispondente alle fasi di rosso delle svolte in Piazzale Labicano, ovvero quando il flusso da quest'ultimo verso Piazza di Porta Maggiore diminuisce. In realtà non vi è mai un tutto-rosso, ma risulta una finestra di 8 secondi dove il solo SG8 ha la fase di verde.

Via di Accesso	Veicoli simulati (veh)	Veicoli non simulati (veh)	domanda servita (veh)	Veicoli in coda (veh)
Via Scalo San Lorenzo	1059	383	1005	54
Via Casilina	843	11	770	73

Tabella 25 analisi dei veicoli, Via Scalo S. Lorenzo e Via Casilina, Scenario 2.1

S2	Ritardo per veicolo (s/veh)	numero di fermate (-)	velocità media (km/h)	ritardo per fermata (s)	Veicoli simulati (-)	Veicoli a destinazione (-)	Veicoli non simulati (-)
MEDIA	220,23	7,34	13,38	159,42	4668	4256	394
DEV. STD.	29,56	0,77	1,43	25,93	125	62	35
MIN	188,73	6,38	11,98	132,45	4532	4204	354
MAX	251,01	8,45	14,89	187,05	4825	4353	430

Tabella 26 parametri del traffico misurati a livello di intera rete, Scenario 2.1

Contatore della coda	Lunghezza media (m)	Lunghezza max (m)	Fermate nella coda medie (-)
3: Via Prenestina	35,96	154,00	885
1: Via dello scalo San lorenzo	446,71	492,06	7370
23: Via_di_Porta_Maggiore	0,00	0,00	0
6: Piazzale_Porta_Maggiore	32,58	154,13	610
7: Piazzale_Porta_Maggiore	16,08	152,31	306
8: Piazzale_Porta_Maggiore	403,05	565,18	3491
20070: Via Prenestina	13,42	155,44	526
20074: Via Eleniana	14,45	63,03	645
20049: Via di Porta Maggiore	16,00	65,68	163

Tabella 27 lunghezza delle code, Scenario 2.1

Si riportano a seguire in tabella 28 i tempi di viaggio per le sezioni principali e il ritardo calcolato rispetto al tempo di viaggio a vuoto (assenza di congestione).

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)
Via Prenestina	82	63	19
Via Casilina	445	51	394
Via Eleniana	43	26	16
Via dello Scalo San Lorenzo	439	39	400
Via di porta Maggiore	33	31	2

Tabella 28 ritardo relativo alle singole vie di accesso, Scenario 2.1

In tabella 29 sono presentati i risultati relativi a consumo ed emissioni per il nodo.

Nodo	Veicoli (Veh)	CO (g)	NOX (g)	VOC (g)	Consumo (litri)
13002: Piazzale Labicano-Porta Maggiore	4668	25501	4961	5910	1379

Tabella 29 emissioni e consumi nel nodo, Scenario 2.1

### 5.1.2.2 Scenario 2.2 – Coordinazione tra Gruppi Segnale a fine fase

Lo Scenario 2.2 preserva le modifiche dello Scenario 2.1, ma attua la coordinazione considerando la fase verde del SG 9 di Piazzale Labicano perfettamente coordinata con la fine della fase verde del SG 1 di Piazza di Porta Maggiore. Questo per cercare di mitigare l'impatto negativo sul deflusso proveniente da Via dello Scalo San Lorenzo. In realtà, come discusso nel capitolo Analisi dei risultati a seguire, tale ipotesi si è rivelata errata, producendo un effetto negativo di propagazione della coda da piazza di Porta Maggiore, che ha influenzato negativamente non solo il deflusso da Via dello Scalo San Lorenzo ma peggiorando anche il deflusso da Via Prenestina.

#### 5.1.2.2.1 Coordinamento semaforico: modifiche apportate rispetto allo Scenario 2.1

Le uniche modifiche apportate rispetto allo Scenario 2.1 sono gli offset dei piani semaforici, riportati nella seguente tabella 30.

Corridoio	OFFSET REALI	
	Scenario 2.1	Scenario 2.2
Prenstina Atac- P. Labicano	54	54
P. Labicano - Piazza Porta Maggiore	19	37
P. S. Croce in Gerusalemme - Via Eleniana - P. Labicano	65	65
Viale Manzoni-Via Porta Maggiore - P. Porta Maggiore	7	25

Tabella 30 offset ricalibrati, Scenario 2.2

Si è quindi posticipato il piano di Piazza di Porta Maggiore in modo che la coordinazione del SG 9 di Piazzale Labicano coincida con la fine del SG1. Questo mantiene comunque la coordinazione per il SG 3 di Piazzale Labicano. In Appendice B sono riportati i diagrammi di fase relativi ai suddetti gruppi segnale.

Nella seguente figura si nota come per Via Casilina la coordinazione scenda ad un valore dello 0% (figura 70).

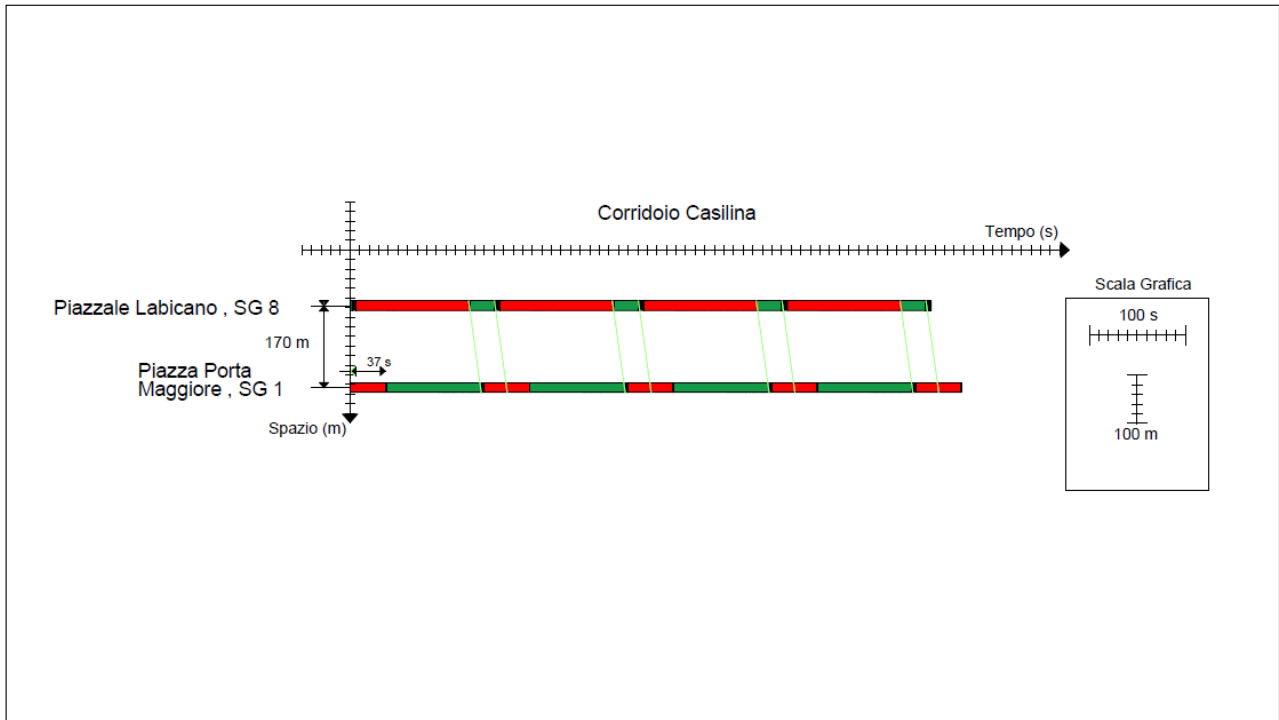


figura 70 grado di coordinazione Corridoio Casilina, Scenario 2.2

Nel corridoio di Via Casilina verso Piazza di porta Maggiore non vi è coordinazione: avendo garantito l'onda verde a fine ciclo per i gruppi segnali di Piazzale Labicano SG 9 e parte del SG 3, i veicoli provenienti da Via Casilina trovano la fase di rosso e si assestano quindi in coda presso Piazza di porta Maggiore. Al ciclo successivo, i veicoli provenienti dal SG 3 di Via Prenestina rallentano per la suddetta coda che trovano a monte. Rallentando, ostacolano il deflusso da Via Prenestina stessa, e si crea coda residua per il ciclo successivo. Contemporaneamente, da Via dello Scalo San Lorenzo sempre meno veicoli possono immettersi in piazza di Porta Maggiore, risultando occupata dalla coda formata dai veicoli provenienti da Via Casilina o dovendo altrimenti dare la precedenza ai veicoli provenienti dai gruppi segnale SG 3 ed SG 9 di piazzale Labicano.

### 5.1.2.2 Risultati Scenario 2.2

Sono riportati in modo analogo a quanto fatto in precedenza per gli Scenari 1 e 2.1, i risultati delle simulazioni.

Contatori di veicoli	Veicoli rilevati (veh)	Via di accesso	domanda servita (veh)	totale domanda generata (veh)	rapporto
Accesso Via dello Scalo 1	349	Via Scalo S. Lorenzo	894	1442	62%
Accesso Via dello Scalo 2	545				
Accesso Via Prenestina 1	486	Via Prenestina	1161	1213	96%
Accesso Via Prenestina 2	675				
Accesso Via Casilina 1	254	Via Casilina	759	854	89%
Accesso Via Casilina 2	505				
Accesso Via Eleniana 1	532	Via Eleniana	1072	1069	100%
Accesso Via Eleniana 2	541				
Accesso Via Porta Maggiore	181	Via Porta Maggiore	181	184	99%

Tabella 31 veicoli rilevati in ingresso al nodo, Scenario 2.2

Via di Accesso	Veicoli simulati (veh)	Veicoli non simulati (veh)	domanda servita (veh)	Veicoli in coda (veh)
Via Scalo San Lorenzo	951	491	894	57
Via Casilina	854	0	759	95

Tabella 32 analisi dei veicoli, Via Scalo S. Lorenzo e Via Casilina, Scenario 2.2

S2.2	Ritardo per veicolo (s/veh)	numero di fermate (-)	velocità media (km/h)	ritardo per fermata (s)	Veicoli simulati (-)	Veicoli a destinazione (-)	Veicoli non simulati (-)
MEDIA	244,74	7,53	12,25	183,13	4584	4115	497
DEV. STD.	25,60	0,70	1,06	21,35	103	39	42
MIN	211,03	6,44	11,03	156,37	4469	4061	439
MAX	275,32	8,22	13,67	210,71	4711	4155	541

Tabella 33 parametri del traffico misurati a livello di intera rete, Scenario 2.2

Contatore della coda	Lunghezza media (m)	Lunghezza max (m)	Fermate nella coda medie (-)
3: Via Prenestina	112,08	310,87	1736
1: Via dello scalo San lorenzo	459,88	492,19	6646
23: Via di Porta Maggiore	0,00	0,00	0
6: Piazzale Porta Maggiore	36,41	204,04	684
7: Piazzale Porta Maggiore	19,19	206,11	327
8: Piazzale Porta Maggiore	417,01	601,98	3758
20070: Via Prenestina	13,42	155,44	526
20074: Via Eleniana	14,45	63,03	645
20049: Via di Porta Maggiore	15,83	70,13	165

Tabella 34 lunghezza delle code, Scenario 2.2

Si riportano a seguire in tabella 35 i tempi di viaggio per le sezioni principali e il ritardo calcolato rispetto al tempo di viaggio a vuoto (assenza di congestione).

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)
Via Prenestina	124	63	61
Via Casilina	461	51	410
Via Eleniana	43	26	17
Via dello Scalo San Lorenzo	516	39	477
Via di porta Maggiore	33	31	2

Tabella 35 ritardo relativo alle singole vie di accesso, Scenario 2.2

In tabella 36 sono presentati i risultati relativi a consumo ed emissioni per il nodo.

Nodo	Veicoli (Veh)	CO (g)	NOX (g)	VOC (g)	Consumo (litri)
13002: Piazzale Labicano-Porta Maggiore	4584	25470	4956	5903	1377

Tabella 36 emissioni e consumi nel nodo, Scenario 2.2

### Scenario 2.3 – Coordinazione tra Gruppi Segnale a fine ciclo con estensione di alcune fasi

Lo Scenario 2.3 preserva la struttura dello Scenario 2.1 con coordinazione ad inizio fase del SG 3 di Piazzale Labicano con il SG 1 di Piazza di Porta Maggiore. La modifica principale riguarda il piano semaforico di piazza di porta Maggiore ed è descritta nel capitolo a seguire.

#### 5.1.2.2.3 Coordinamento semaforico: modifiche apportate rispetto allo Scenario 2.1

Conservando gli offset utilizzati nello Scenario 2.1, dai risultati degli scenari precedenti è risultato che la durata limitata della fase di verde del gruppo segnale SG 1 di Piazza di Porta Maggiore porta alla formazione di coda, principalmente formata dai veicoli provenienti da Via Casilina e dalle corsie centrali relative al SG9, che non hanno la totalità del verde coordinato con il SG 1 di Piazza di Porta Maggiore. Una maggiore durata del verde per quest'ultimo permette di aumentare la capacità, liberando una parte della coda, e aumentando anche il deflusso da Via dello Scalo San Lorenzo. Da quest'ultima, infatti, i veicoli possono incolonnarsi nelle corsie di Piazza di Porta Maggiore durante la fase di rosso del SG 1. Per tale motivo la fase di verde del SG 1 di Piazza di Porta Maggiore è stata aumentata di 6 secondi. L'offset rimane il medesimo dello Scenario 2.1 pari a 47 secondi rispetto a Piazzale Labicano. Nelle due figure 71-72 seguenti si riportano il piano da 150 secondi originale e quello modificato.

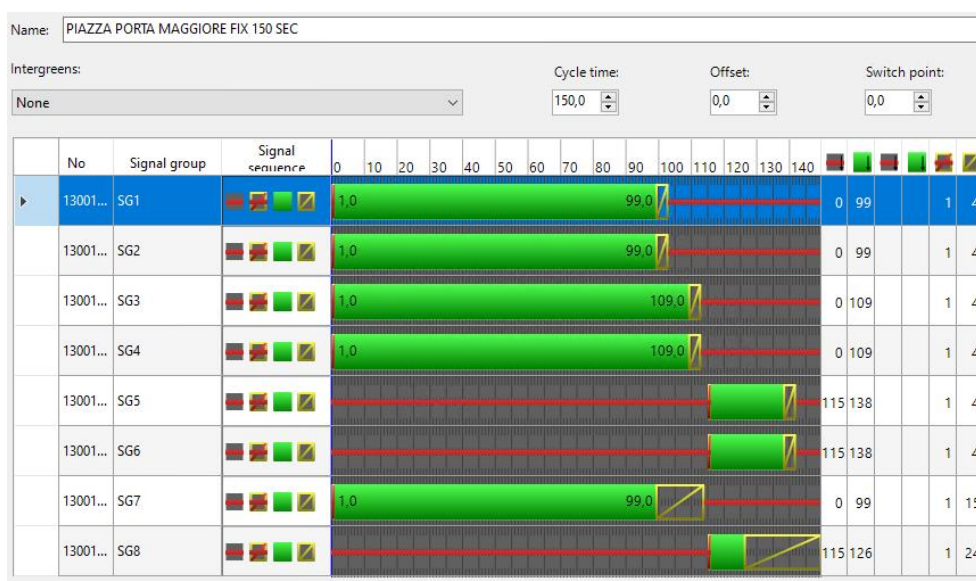


figura 71 piano semaforico Scenario 2.1 di durata 150 secondi, Piazzale Labicano



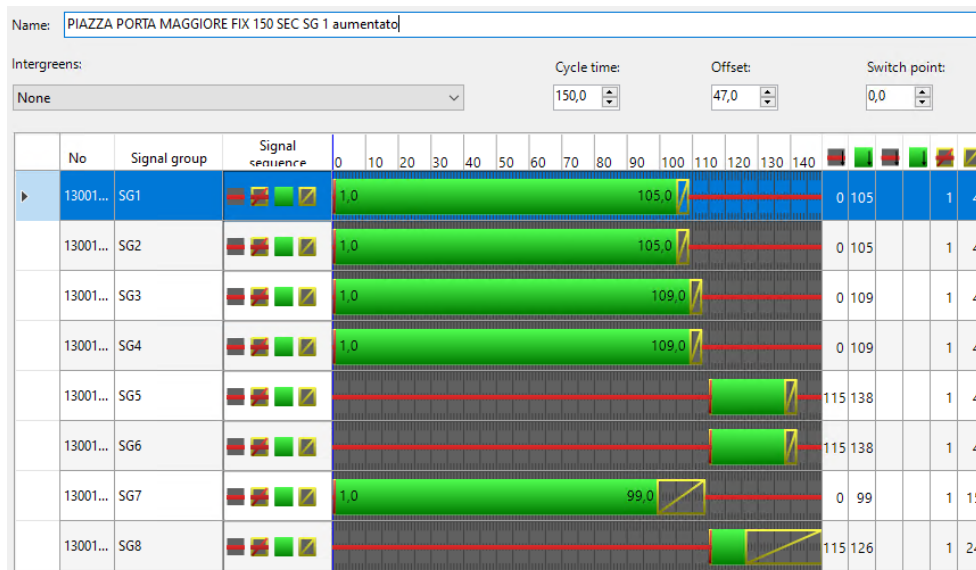


figura 72 piano semaforico Scenario 2.3 di durata 150 secondi, Piazzale Labicano

Nelle seguenti figure sono riportati i diagrammi tempo-spazio con la nuova configurazione. In particolare, la coordinazione si preserva analoga a quella garantita nello Scenario 2.1, aumentando però il verde coordinato del SG9. Via Casilina rimane esclusa dalla coordinazione, ma i veicoli provenienti da essa sono gli unici di Piazzale Labicano a partecipare alla coda in Piazza di Porta Maggiore (figura 73).

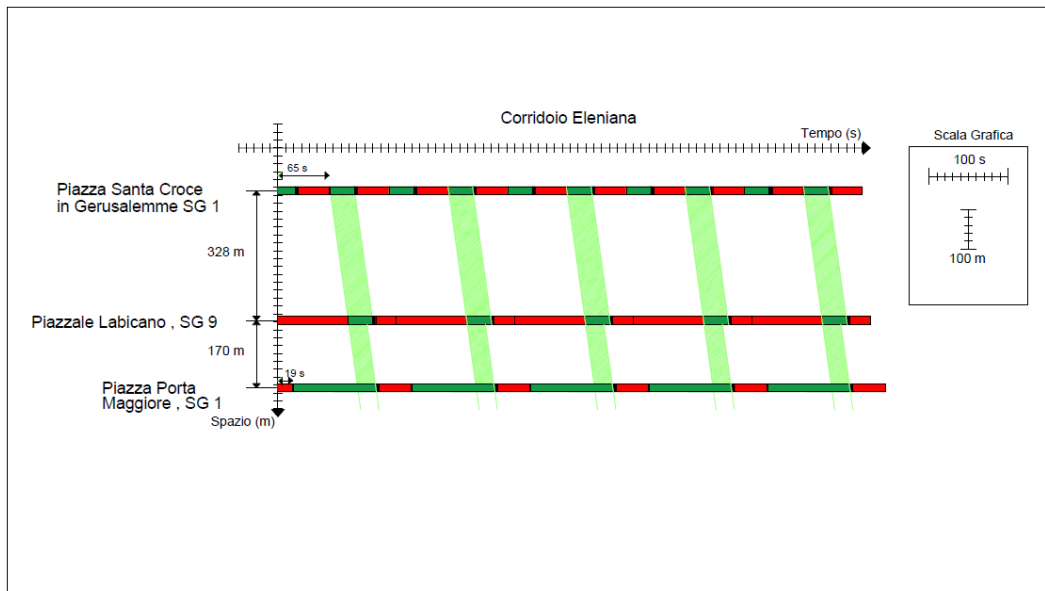


figura 73 coordinazione Corridoio Eleniana (SG9, Piazzale Labicano), Scenario 2.3

Con l'allungamento del verde del SG 1 di Piazza di Porta Maggiore, per il corridoio di Via Casilina il tempo di verde coordinato rimane nullo ma aumenta il verde coordinato del SG9 da un valore originale di 17 secondi ad un nuovo valore di 23 secondi. Questo permette, in teoria, di aumentare la capacità di 3 veicoli per corsia durante la fase di verde. Nonostante la piccola modifica, i risultati sono notevoli, come riportato nel capitolo "6 Analisi dei risultati".

### 5.1.2.2.4 Risultati Scenario 2.3

Sono riportati in modo analogo a quanto fatto in precedenza i risultati delle simulazioni.

Contatori di veicoli	Veicoli rilevati (veh)	Via di accesso	domanda servita (veh)	totale domanda generata (veh)	rapporto
Accesso Via dello Scalo 1	427	Via Scalo S. Lorenzo	1103	1442	77%
Accesso Via dello Scalo 2	677		Via Prenestina	1182	1213
Accesso Via Prenestina 1	469	Via Casilina		771	854
Accesso Via Prenestina 2	713		Via Eleniana	1072	1069
Accesso Via Casilina 1	265	Via Porta Maggiore		181	184
Accesso Via Casilina 2	506				
Accesso Via Eleniana 1	532				
Accesso Via Eleniana 2	541				
Accesso Via Porta Maggiore	181				

Tabella 37 veicoli rilevati in ingresso al nodo, Scenario 2.3

Via di Accesso	Veicoli simulati (veh)	Veicoli non simulati (veh)	domanda servita (veh)	Veicoli in coda (veh)
Via Scalo San Lorenzo	1169	273	1103	66
Via Casilina	847	7	771	76

Tabella 38 analisi dei veicoli, Via Scalo S. Lorenzo e Via Casilina, Scenario 2.3

S2.3	Ritardo per veicolo (s/veh)	numero di fermate (-)	velocità media (km/h)	ritardo per fermata (s)	Veicoli simulati (-)	Veicoli a destinazione (-)	Veicoli non simulati (-)
MEDIA	207,52	6,67	13,95	150,49	4769	4349	277
DEV. STD.	26,63	0,83	1,40	20,89	118	61	33
MIN	178,84	5,75	12,69	127,61	4634	4282	227
MAX	232,14	7,53	15,50	170,31	4917	4447	315

Tabella 39 parametri del traffico misurati a livello di intera rete, Scenario 2.3

Contatore della coda	Lunghezza media (m)	Lunghezza max (m)	Fermate nella coda medie (-)
3: Via Prenestina	30,67	132,53	807
1: Via dello scalo San Lorenzo	431,92	492,31	7248
23: Via di Porta Maggiore	0,00	0,00	0
6: Piazzale Porta Maggiore	30,65	146,70	586
7: Piazzale Porta Maggiore	12,93	131,15	277
8: Piazzale Porta Maggiore	403,63	578,85	3549
20070: Via Prenestina	13,42	155,44	526
20074: Via Eleniana	14,45	63,03	645
20049: Via di Porta Maggiore	16,00	65,68	163

Tabella 40 lunghezza delle code, Scenario 2.3

Si riportano a seguire in tabella 41 i tempi di viaggio per le sezioni principali e il ritardo calcolato rispetto al tempo di viaggio a vuoto (assenza di congestione).

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)
Via Prenestina	79	63	16
Via Casilina	438	51	387
Via Eleniana	41	26	15
Via dello Scalo San Lorenzo	303	39	264
Via di porta Maggiore	33	31	2

Tabella 41 ritardo relativo alle singole vie di accesso, Scenario 2.3

In Tabella 42 sono presentati i risultati relativi a consumo ed emissioni per il nodo.

Nodo	Veicoli (Veh)	CO (g)	NOX (g)	VOC (g)	Consumo (litri)
13002: Piazzale Labicano-Porta Maggiore	4769	24381	4744	5650	1318

Tabella 42 emissioni e consumi nel nodo, Scenario 2.3

## 6 Analisi dei risultati

Nel seguente capitolo verranno confrontati i risultati ottenuti nei diversi scenari, prendendo singolarmente ciascuna via di accesso al nodo e successivamente analizzando il nodo come entità unica. Particolare attenzione sarà posta alle due arterie critiche di Via Casilina e Via dello Scalo San Lorenzo, per le quali la domanda simulata non corrispondeva alla domanda generata fornita dalla matrice O/D.

### 6.1 Via dello Scalo San Lorenzo

Il deflusso in Via dello scalo San Lorenzo dipende fortemente dalla coordinazione per i motivi già discussi in precedenza. Dovendo garantire infatti la precedenza ai flussi provenienti da Piazzale Labicano, i veicoli provenienti da questa arteria possono immettersi solo durante le fasi di rosso dei gruppi segnale SG 3, SG 9 ed SG 8 di Piazzale Labicano, o durante la fase di svolta a destra del SG 5 in direzione di Via Prenestina. Sono inoltre condizionati dalla presenza di coda residua in Piazza di Porta Maggiore. Nello Scenario 2.1 la coordinazione ad inizio fase del SG 3 di Piazzale Labicano con SG 1 di Piazza di Porta Maggiore non riesce a garantire un deflusso da Via dello Scalo San Lorenzo pari a quello dello Stato di Fatto (tabella 43).

Via di Accesso	Veicoli simulati (veh)	Veicoli non simulati (veh)	domanda servita (veh)	Veicoli in coda (veh)
Via dello Scalo San lorenzo - Scenario 1	1108	334	1061	47
Via dello Scalo San lorenzo - Scenario 2.1	1059	383	1005	54
Via dello Scalo San lorenzo - Scenario 2.2	951	491	894	58
Via dello Scalo San lorenzo - Scenario 2.3	1169	273	1103	66

Tabella 43 domanda veicolare, via Scalo dello Scalo San Lorenzo

Lo scenario 2.2 è peggiorativo: la coda residua provocata dai veicoli provenienti da Via Casilina (SG 8, Piazzale Labicano), che non hanno il verde coordinato con il SG 1 di Piazza di Porta Maggiore, non permettono il defluire del traffico da Via dello Scalo San Lorenzo.

Nello Scenario 2.3 l'estensione del verde in Piazza di porta Maggiore e la coordinazione con esso delle fasi di verde dei gruppi segnale SG 3 ed SG 9, hanno un effetto positivo sul deflusso da Via dello Scalo San Lorenzo.

Nel grafico a seguire (figura 74) sono riportati i valori dei veicoli non simulati e dei veicoli in coda all'istante di fine simulazione. Nonostante la coda appaia maggiore, sono stati simulati 61 veicoli in più rispetto allo stato di fatto e ben 110 veicoli in più rispetto allo Scenario 2.1

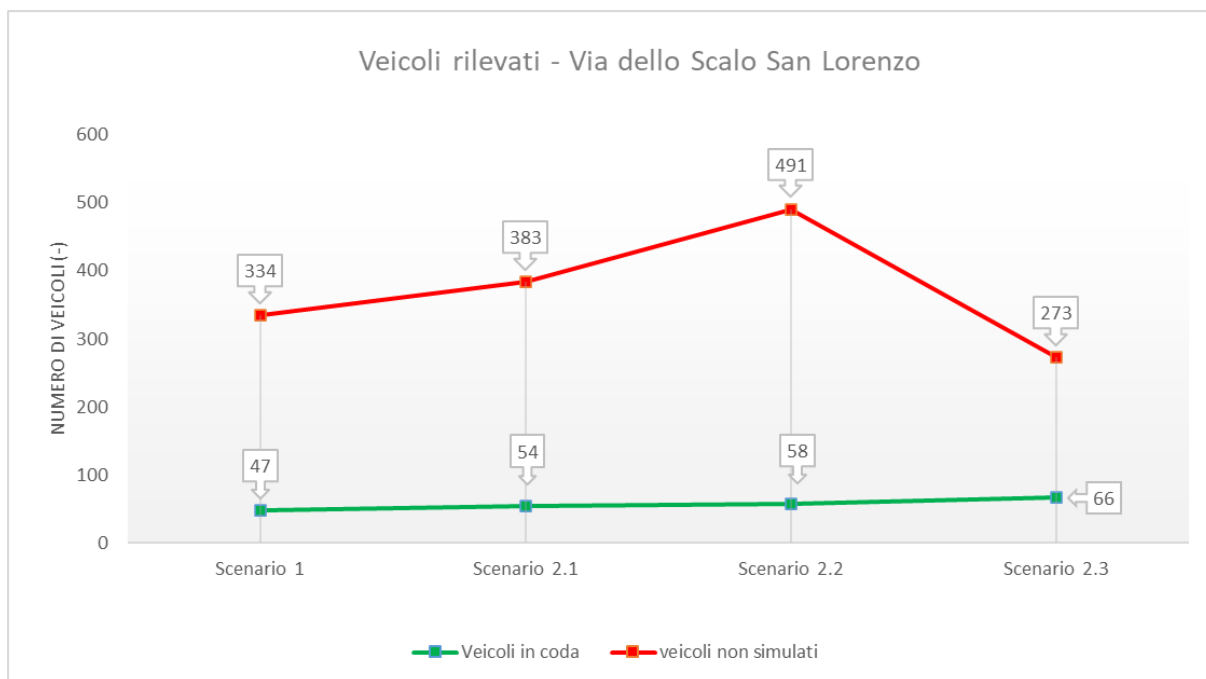


figura 74 veicoli in coda e non simulati, Via dello Scalo San Lorenzo

La coda media in realtà diminuisce rispetto agli scenari precedenti (figura 75).

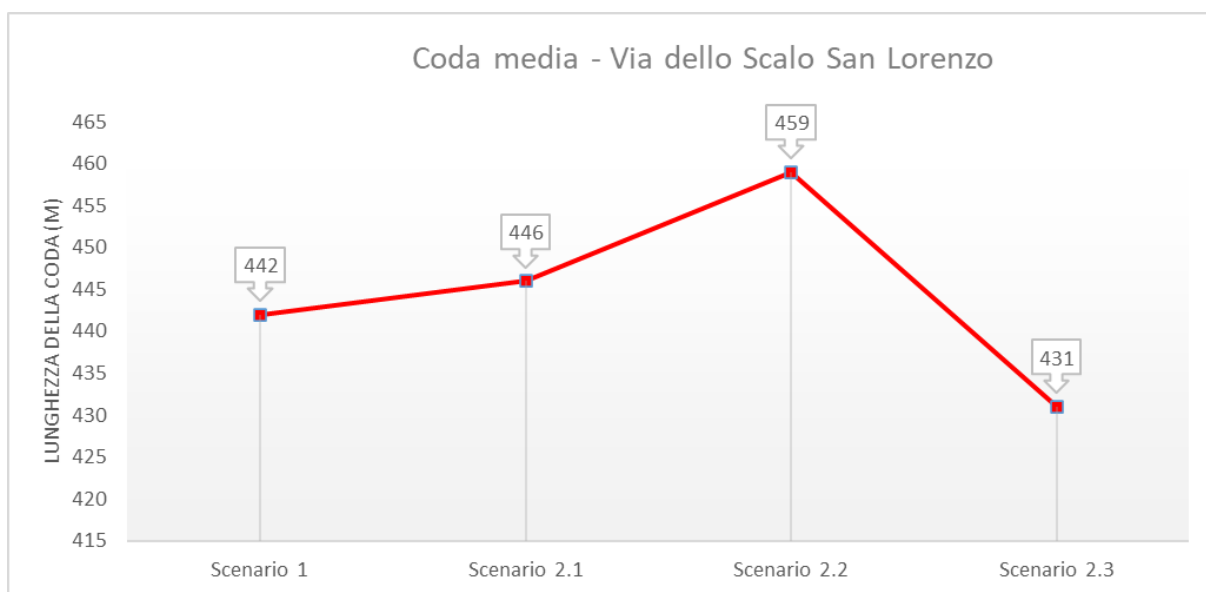


figura 75 lunghezza media della coda, Via dello Scalo San Lorenzo

Nella seguente tabella 44 è riportato il rapporto in percentuale tra numero di veicoli non simulati rispetto alla domanda generata secondo matrice O/D. I veicoli simulati nello Scenario 2.3 sono il 4% in più rispetto a quelli simulati nello Scenario 1.

Via di Accesso	domanda (veh)	Veicoli non simulati (veh)	Rapporto (%)
Via dello Scalo San lorenzo - Scenario 1	1442	334	23%
Via dello Scalo San lorenzo - Scenario 2.1		383	27%
Via dello Scalo San lorenzo - Scenario 2.2		491	34%
Via dello Scalo San lorenzo - Scenario 2.3		273	19%

Tabella 44 rapporto tra veicoli non simulati e domanda generata, Via dello Scalo San Lorenzo

Le prestazioni in termini di velocità e ritardo sono migliorate come si evince dai seguenti grafici.

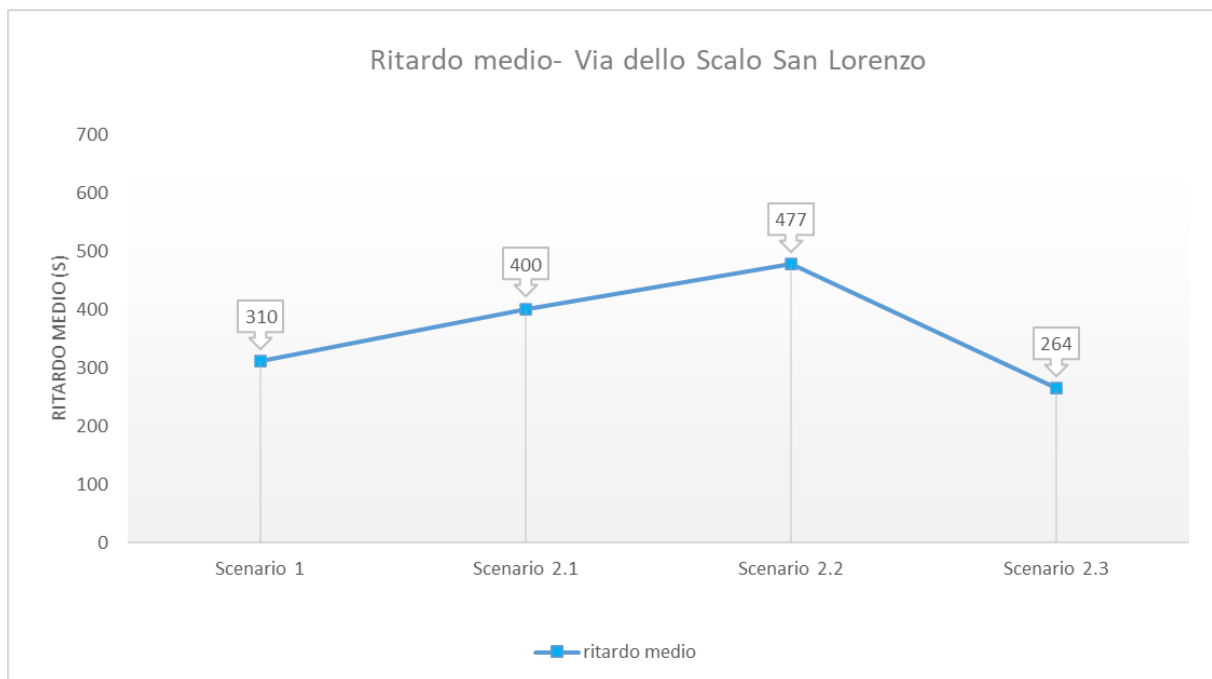


figura 76 ritardo medio per veicolo, Via dello Scalo San Lorenzo

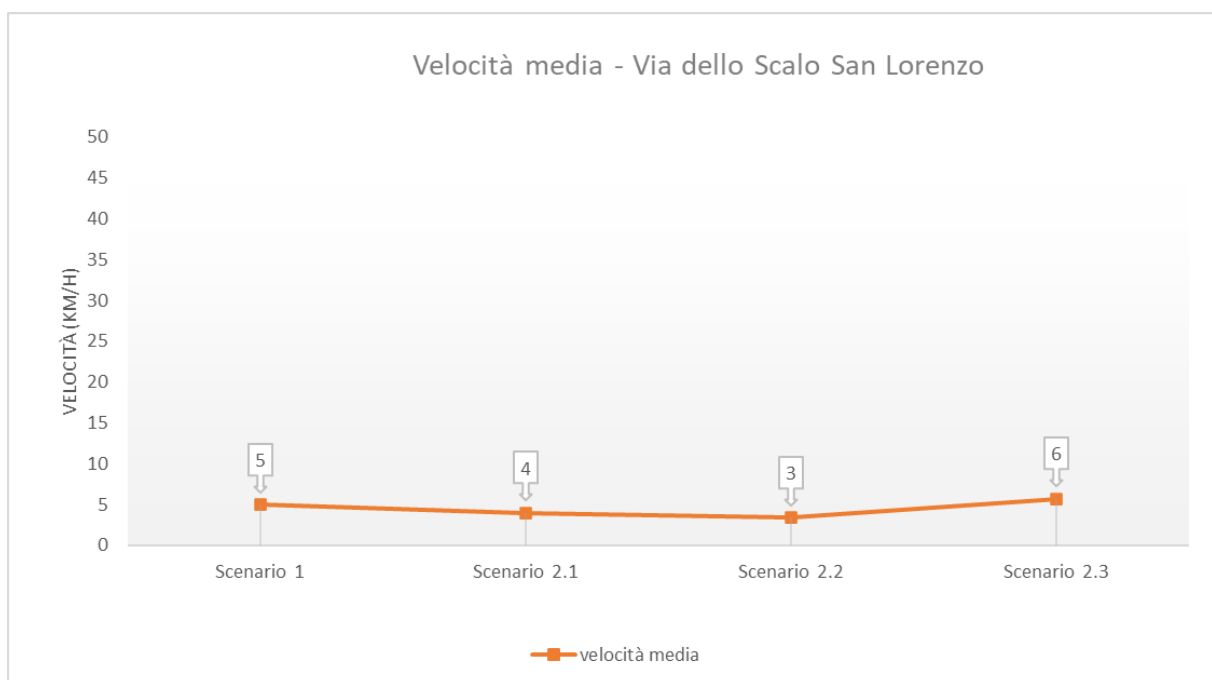
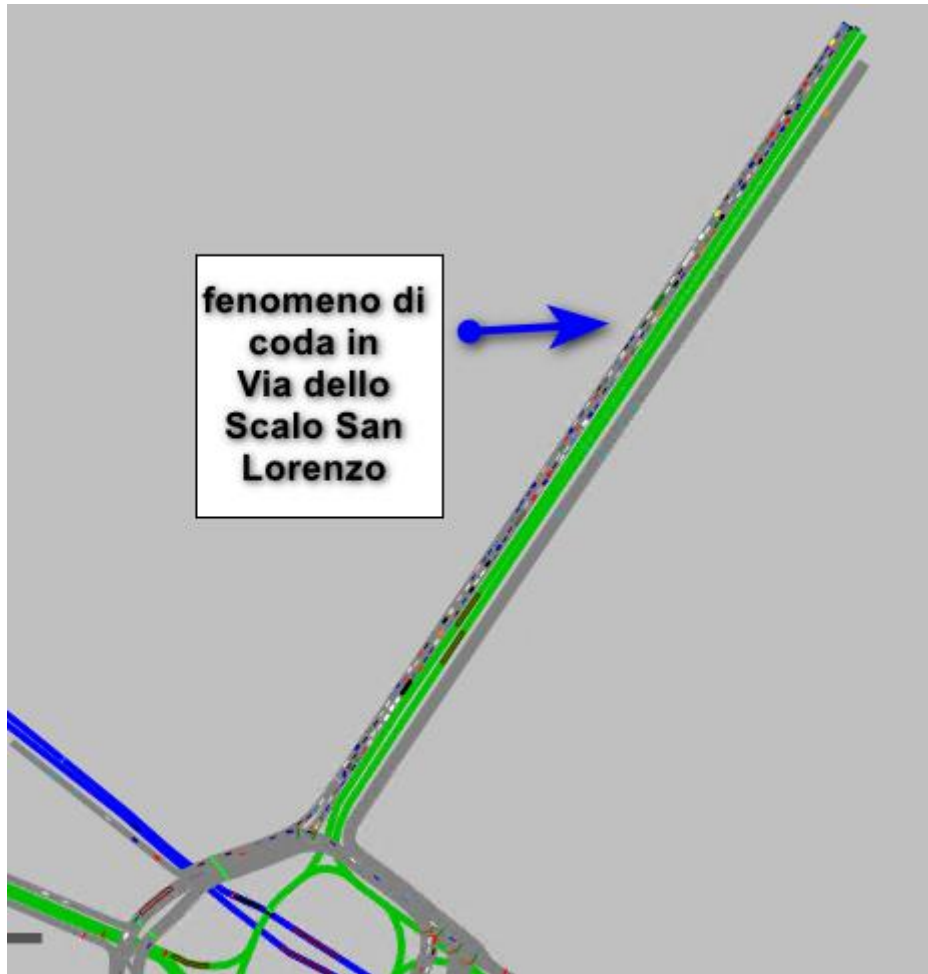


figura 77 velocità media per veicolo, Via dello Scalo San Lorenzo

Osservando il dato relativo alla velocità media risulta comunque evidente come la congestione rimanga per questa arteria notevole ed il deflusso rimanga in condizione di saturazione. È di seguito riportata in figura 78 la condizione relativa alla simulazione dello Scenario 2.3 al secondo 4000: la coda si estende per tutta la lunghezza di via dello Scalo san Lorenzo. I veicoli viaggiano con stop&go continui.



*figura 78 coda all'istante 4000s della simulazione in Via dello Scalo San Lorenzo, Scenario 2.3*

## 6.2 Via Casilina

Il problema della limitata portata di saturazione, per limitata durata del verde, è stato risolto con l'allungamento della fase di verde del SG 8 di Piazzale Labicano. La domanda è simulata al 100%, come si evince dalle seguenti (figura 79 e tabella 45 ) (7 veicoli sono considerati trascurabili).

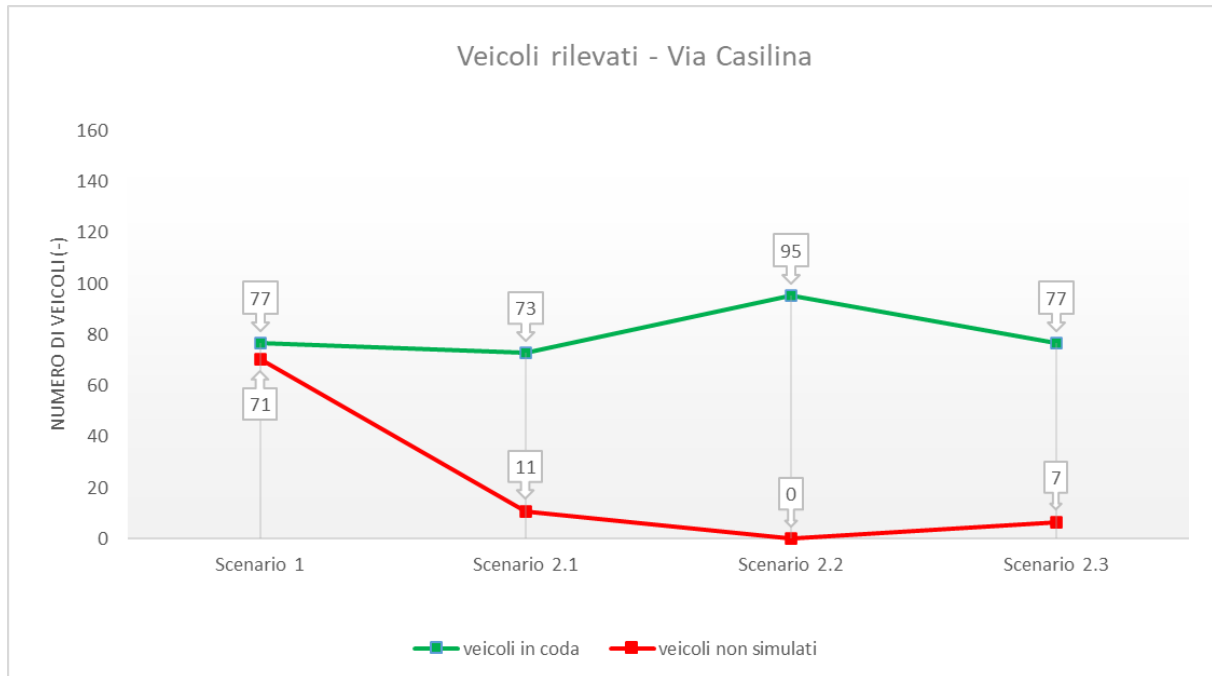


figura 79 veicoli in coda e non simulati, Via Casilina

Via di Accesso	domanda (veh)	Veicoli non simulati (veh)	Rapporto (%)
Via Casilina - Scenari 1	854	71	8%
Via Casilina - Scenari 2.1		11	1%
Via Casilina - Scenari 2.2		0	0%
Via Casilina - Scenari 2.3		7	1%

Tabella 45 rapporto tra veicoli non simulati e domanda generata, Via Casilina

Nella precedente tabella 45 è riportato il rapporto tra veicoli non simulati rispetto alla domanda generata. Con la soluzione adottata (allungamento fase di verde), il 100% dei veicoli accede al modello, rispetto ad un valore relativo allo Scenari 1 del 92%.

Osservando figura 80 la coda sembrerebbe aumentare anche in Via Casilina: si tratta in realtà della condizione a fine simulazione. Nel seguente grafico si osserva come la coda media in realtà si sia ridotta.

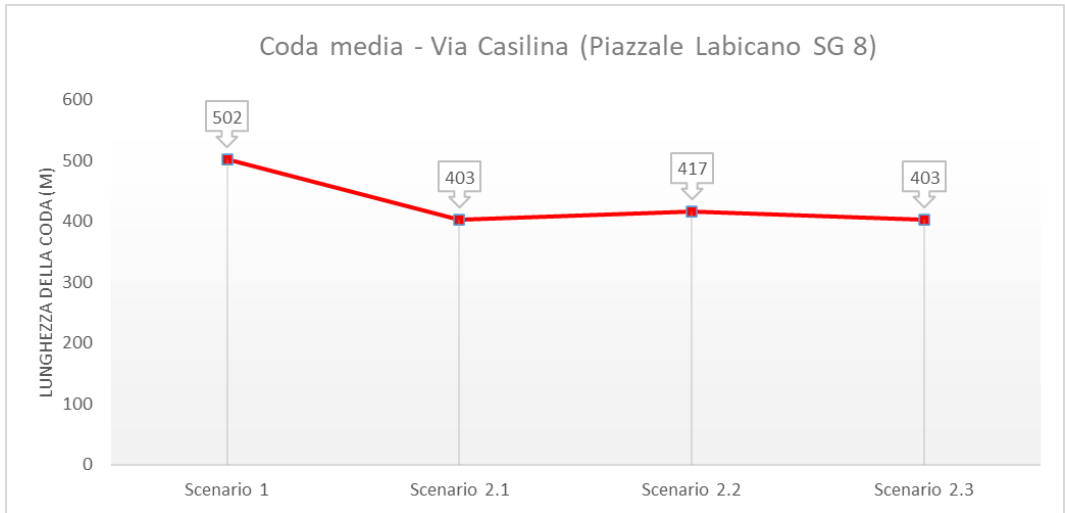


figura 80 lunghezza della coda media, via Casilina

Il deflusso migliora notevolmente, sia in termini di ritardo che di velocità. (Figure 81-82)

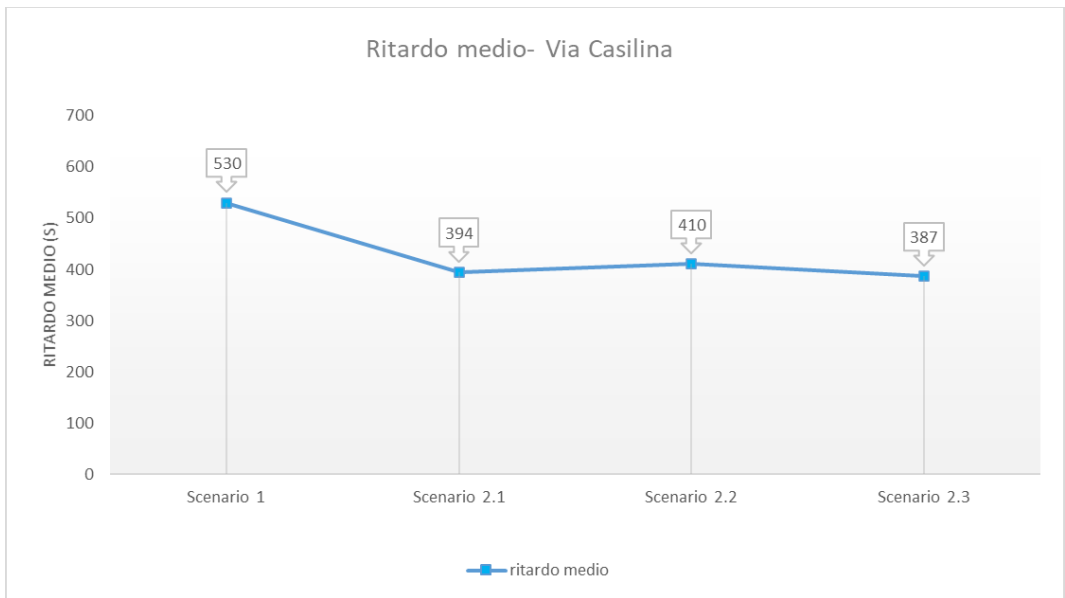
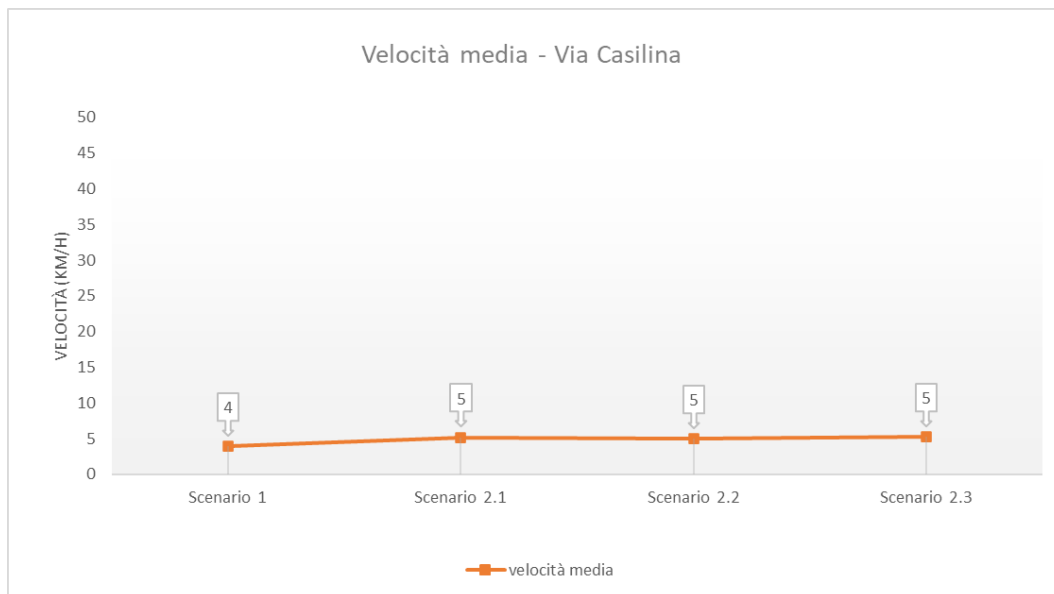


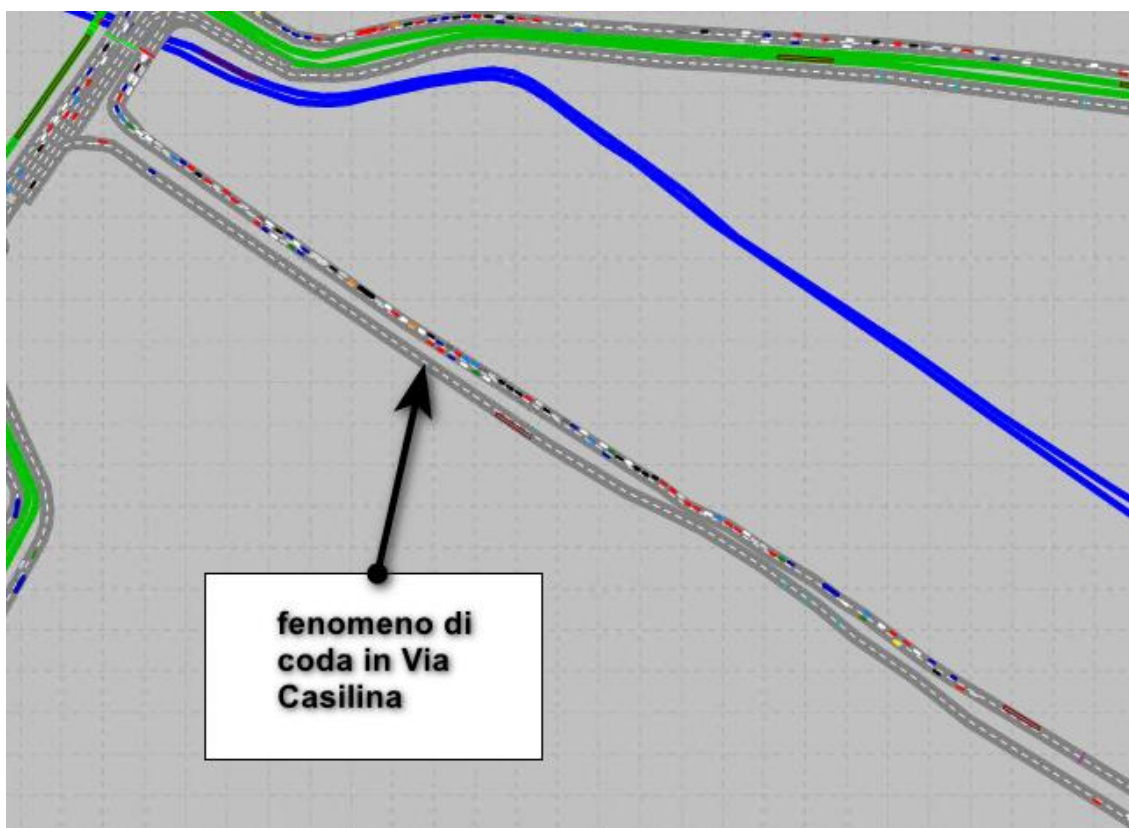
figura 81 ritardo medio per veicolo, via Casilina





*figura 82 velocità media per veicolo, via Casilina*

Come per Via dello Scalo San Lorenzo, dai dati relativo alla velocità si evince come la congestione ed il fenomeno di formazione delle code rimanga persistente. Nella seguente figura 83 è rappresentata la condizione di coda al secondo 4000 della simulazione dello Scenario 2.3.



*figura 83 coda all'istante 4000s della simulazione in Via Casilina, Scenario 2.3*

### 6.3 Via Prenestina

Via Prenestina è l'unica arteria non caratterizzata da miglioramento. Questo è causato dalla strategia implementata per sfruttare la capacità di accumulo della coda di Via Prenestina, per favorire Via Casilina e il deflusso in generale verso Piazza di porta Maggiore, attuata riducendo il verde di Via Prenestina per aumentarlo in Via Casilina. La domanda in ingresso è osservata anche in uscita durante l'esperimento condotto in simulazione.

Via Prenestina è una arteria stradale composta di due corsie per il 90% della lunghezza che unisce l'incrocio di Deposito Atac con Piazzale Labicano. La lunghezza di questo segmento è di circa 780m. I valori della coda media in Via Prenestina rimangono circa costanti rispetto allo Scenario 1 (figura 84), a causa della piccola riduzione della durata della fase di verde e della conseguente riduzione di portata di saturazione.

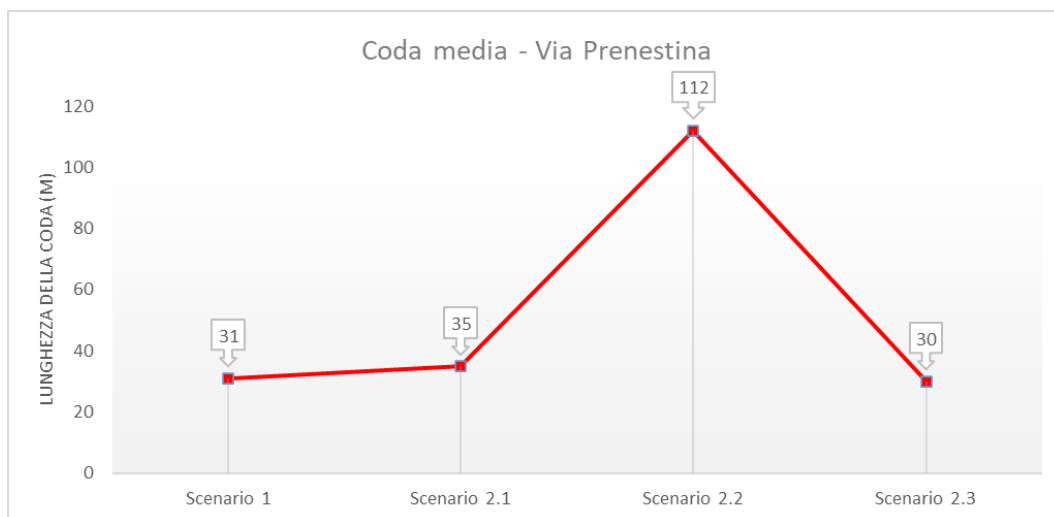
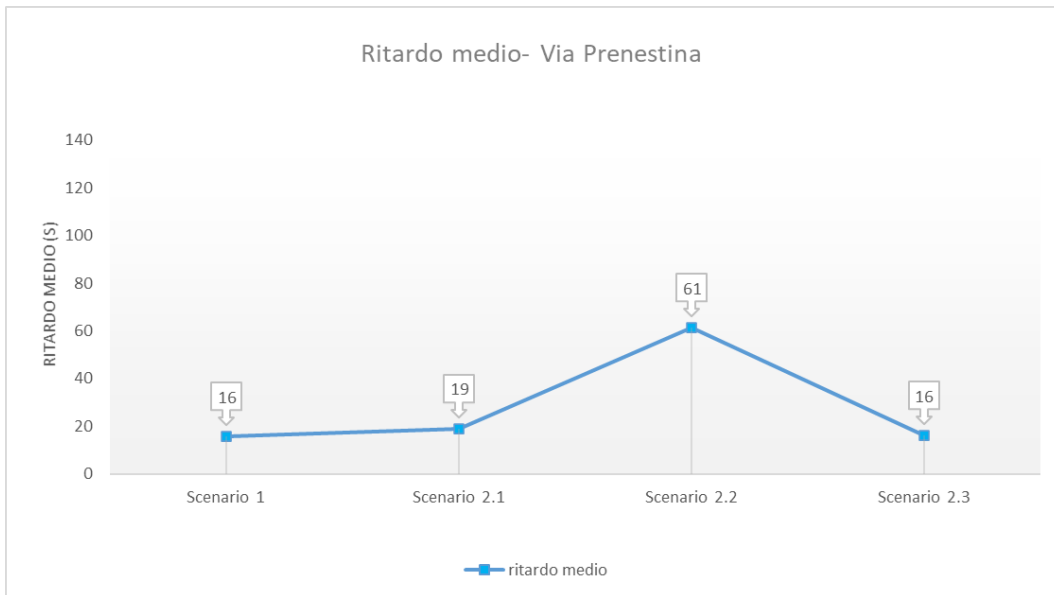
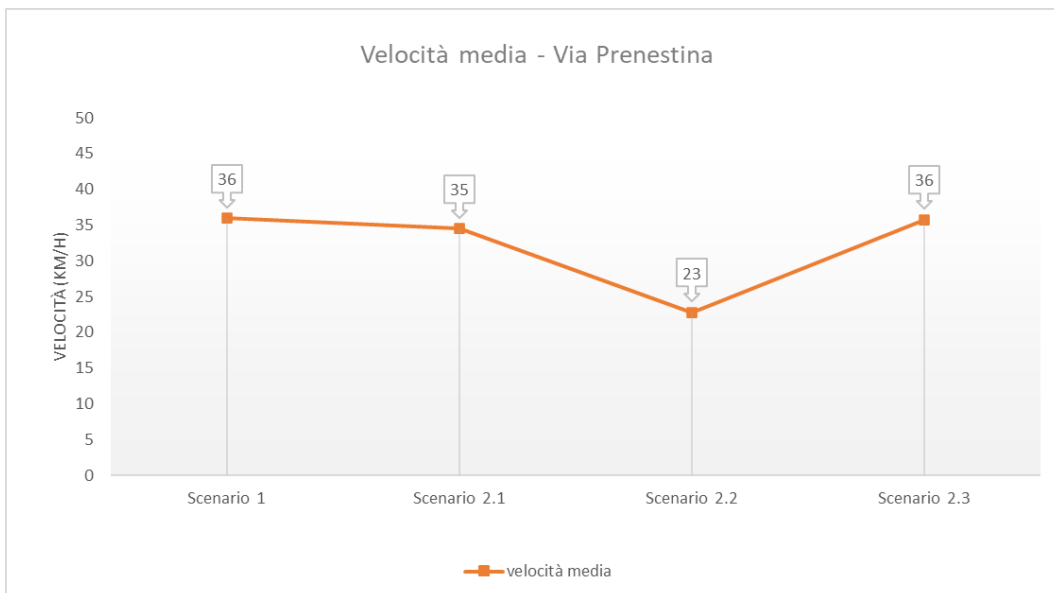


figura 84 lunghezza della coda media, Via Prenestina

Le prestazioni rimangono paragonabili considerando lo Scenario 2.3 rispetto allo Stato di Fatto.



*figura 85 ritardo medio per veicolo, via Prenestina*



*figura 86 velocità media per veicolo, via Prenestina*

## 6.4 Via Eleniana

Via Eleniana è caratterizzata da condizioni di circolazione in linea alle aspettative per tutti gli scenari coordinati, ad eccezione dello Scenario 2.2 dove il fenomeno di propagazione della coda da Piazza di porta Maggiore peggiora le prestazioni. Tale fenomeno, in generale è stato osservato per tutte le arterie stradali coinvolte.

La presenza di coordinazione garantita nello Scenario 2.3 si traduce in un generale aumento della velocità media, una diminuzione dei ritardi ed una diminuzione delle code. Nelle seguenti figure sono riportati i risultati osservati.

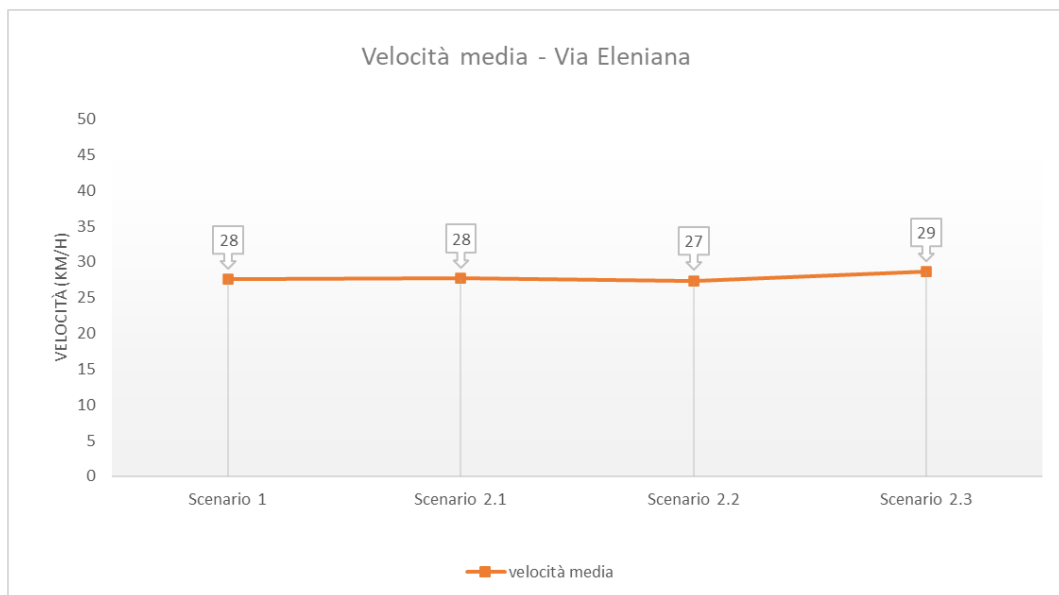


figura 87 velocità media per veicolo, via Eleniana

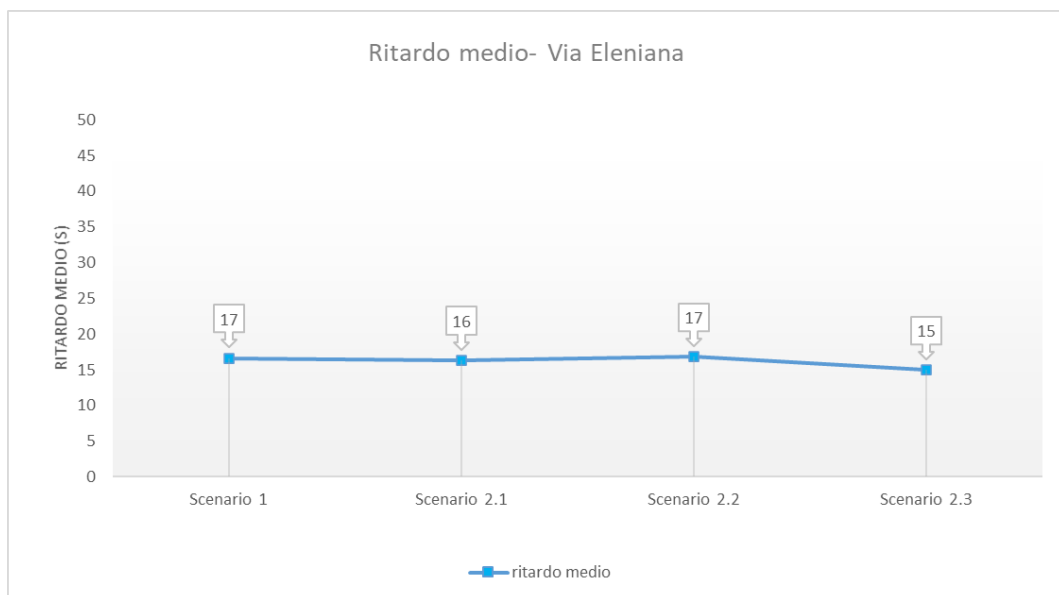


figura 88 ritardo medio per veicolo, via Eleniana

Le code si distinguono in base al gruppo segnale in cui la corrente di traffico si attesta. Questi valori sono leggermente influenzati dai flussi provenienti da Via dello Scalo e da Via di porta Maggiore. In generale però il flusso maggiore che caratterizza queste due code proviene da Piazza di Santa Croce in Gerusalemme lungo Via Eleniana.

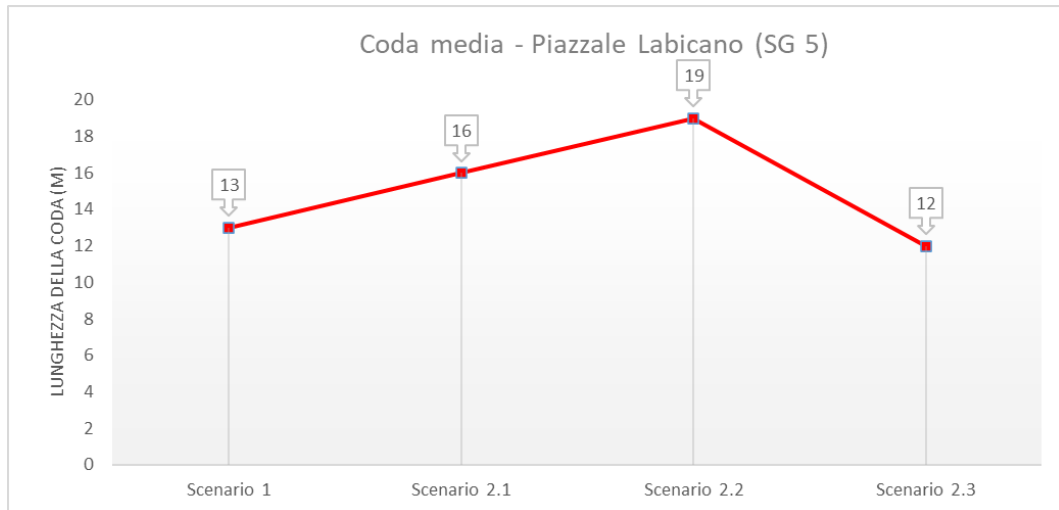


figura 89 lunghezza della coda media, via Eleniana

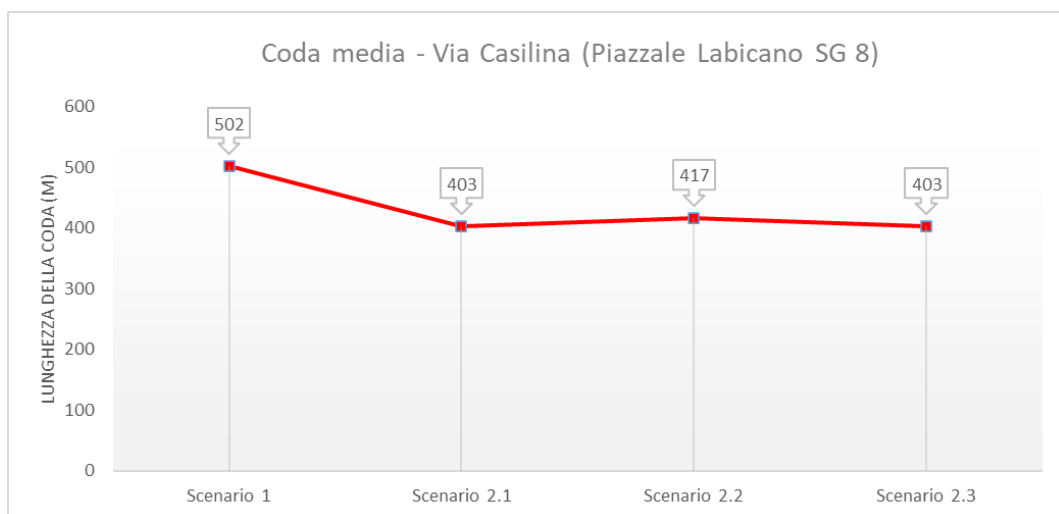


figura 90 lunghezza della coda media, Piazzale Labicano SG9

## 6.5 Via di Porta Maggiore

Come descritto nel capitolo “Descrizione dello Stato di Fatto”, in Via di porta Maggiore il flusso simulato è poco rilevante se paragonato alle altre vie di accesso al nodo. Inoltre, la coordinazione con Piazza di porta Maggiore è sempre realizzabile, coordinando l’intera fase di verde dell’intersezione Viale Manzoni-Via di porta Maggiore precedente con il gruppo segnale SG 6 di Piazza di porta Maggiore. Questo si traduce nell’unico caso effettivo di onda verde nel modello simulato, con ritardi che arrivano a valori nulli e code mai presenti. (figure 92-93)

In generale questa via non costituiva un problema anche nello scenario originale (Scenario 1), come si evince soprattutto dalle figure 93-94 relative al ritardo medio e alla velocità media.

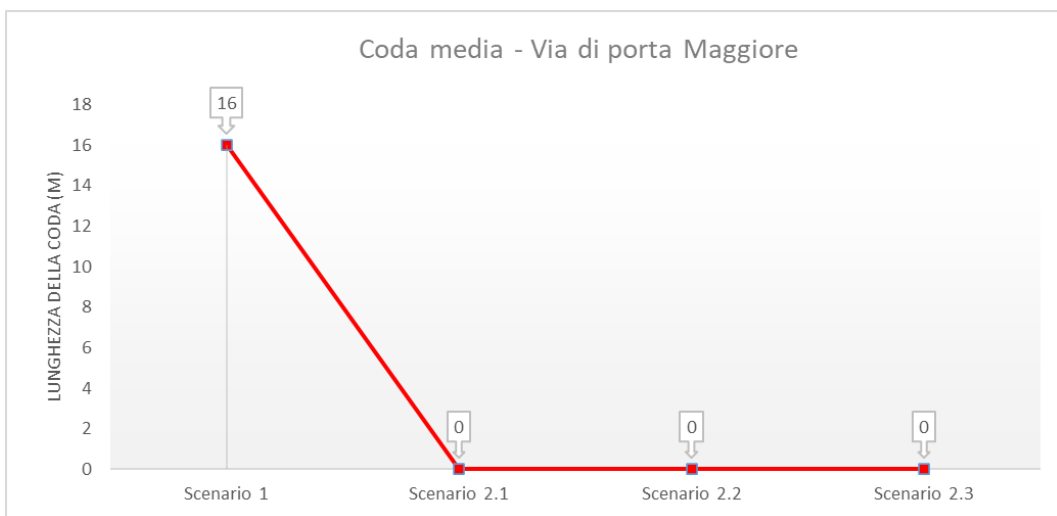


figura 91 lunghezza della coda media, via di Porta Maggiore

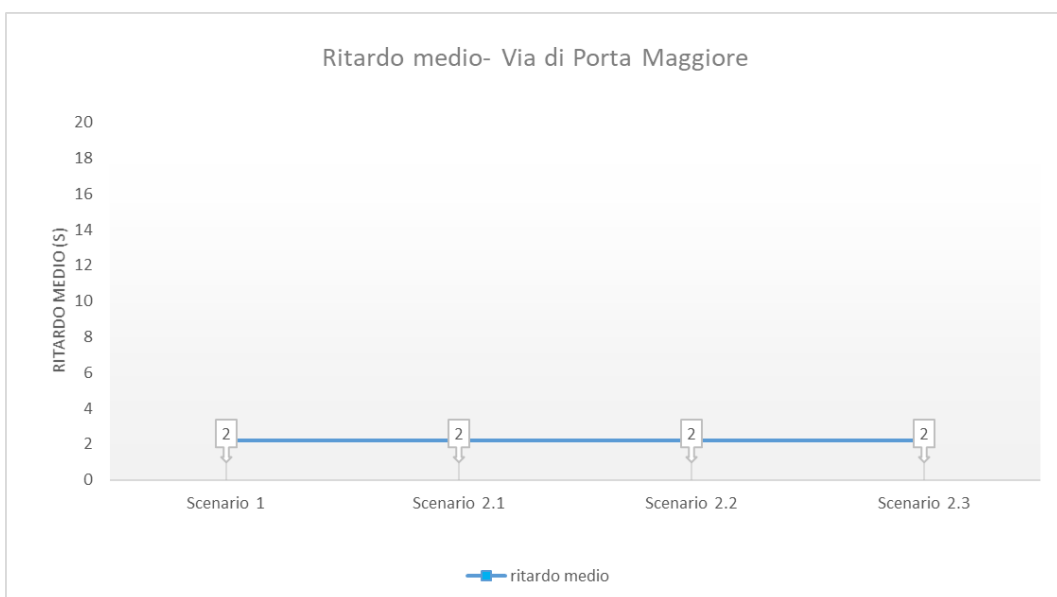


figura 92 ritardo medio per veicolo, via di Porta Maggiore



*figura 93 velocità media per veicolo, via di Porta Maggiore*

## 6.6 Osservazioni al nodo

Il nodo nella sua interezza è stato considerato per ottenere una panoramica sui risultati in generale che le nuove strategie di gestione hanno in confronto allo Scenario 1 relativo allo stato di fatto.

In particolare, il ritardo e il numero di veicoli simulati permettono la stima della diminuzione totale del ritardo nel nodo. In tabella 46 si può osservare come la coordinazione negli Scenari 2.1 e 2.3 permetta di simulare un numero di veicoli maggiore. In particolare, nello Scenario 2.3 sono simulati 66 veicoli in più dello Scenario 1. È cresciuto allo stesso modo il numero di veicoli che giungono a destinazione, 82 veicoli in più rispetto allo Scenario 1.

	Veicoli simulati (veh)	Veicoli a destinazione (veh)	Veicoli non simulati (veh)
Scenario 1	4703	4267	380
Scenario 2.1	4668	4256	394
Scenario 2.2	4584	4115	497
Scenario 2.3	4769	4349	277

Tabella 46 veicoli simulati nel nodo di Porta Maggiore

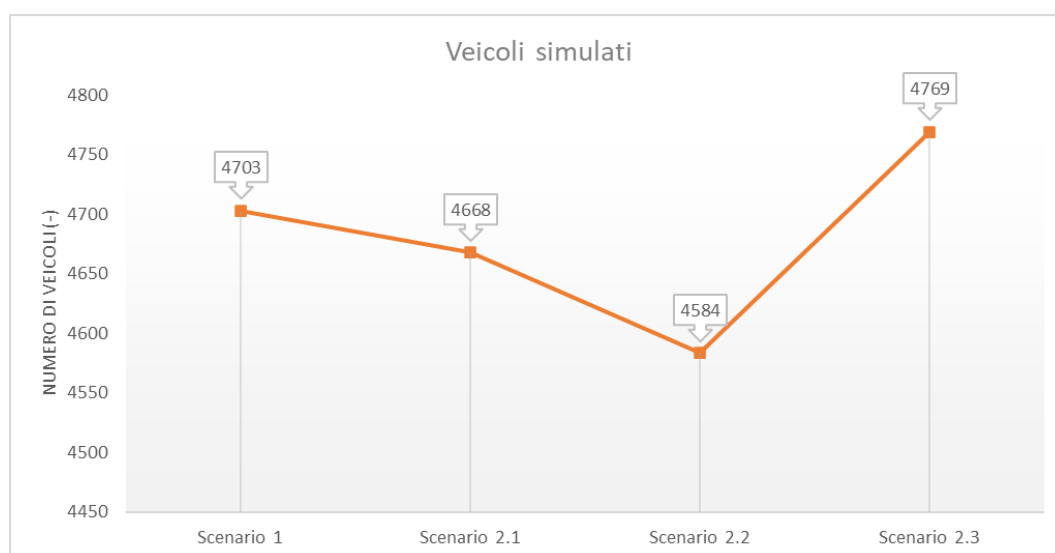


figura 94 veicoli simulati nel nodo di Porta Maggiore

Il ritardo medio per veicolo decresce di circa 30 secondi, che moltiplicato per un numero medio di 4700 veicoli simulati, porta ad una riduzione totale del ritardo di 141000 secondi, ovvero circa 39 ore di ritardo in meno per un'ora di picco mattutino simulata. Considerando che in realtà il valore di flusso del picco orario mattutino si osserva per una durata di circa due ore, in totale verranno risparmiate 78 ore di tempo di viaggio.



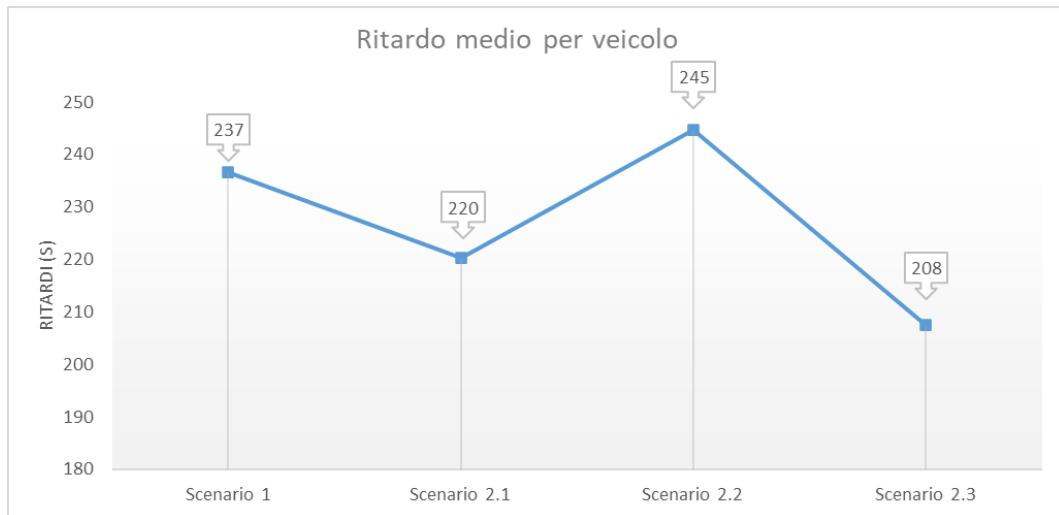


figura 95 ritardo medio per veicolo, nodo di Porta Maggiore

### 6.6.1 Consumi

Come noto in letteratura, i consumi delle autovetture crescono quando il deflusso è caratterizzato da movimenti di tipo stop&go, con veicoli che viaggiano a velocità limitate e quindi con consumi più elevati. La riduzione del numero totale di fermate è in linea con la riduzione dei consumi, osservabile nella seguente tabella 47 e successive figure.

Nodo	Veicoli (Veh)	CO (g)	NOX (g)	VOC (g)	Consumo (galloni)	Consumo (litri)
13002: Piazzale Labicano-Porta Maggiore Scenario 1	3772	27859	5420	6457	399	1506
13002: Piazzale Labicano-Porta Maggiore Scenario 2.1	3766	25501	4961	5910	365	1378
13002: Piazzale Labicano-Porta Maggiore Scenario 2.2	3618	25470	4956	5903	364	1377
13002: Piazzale Labicano-Porta Maggiore Scenario 2.3	3858	24381	4744	5650	349	1318

Tabella 47 emissioni e consumi di carburante, nodo di Porta Maggiore

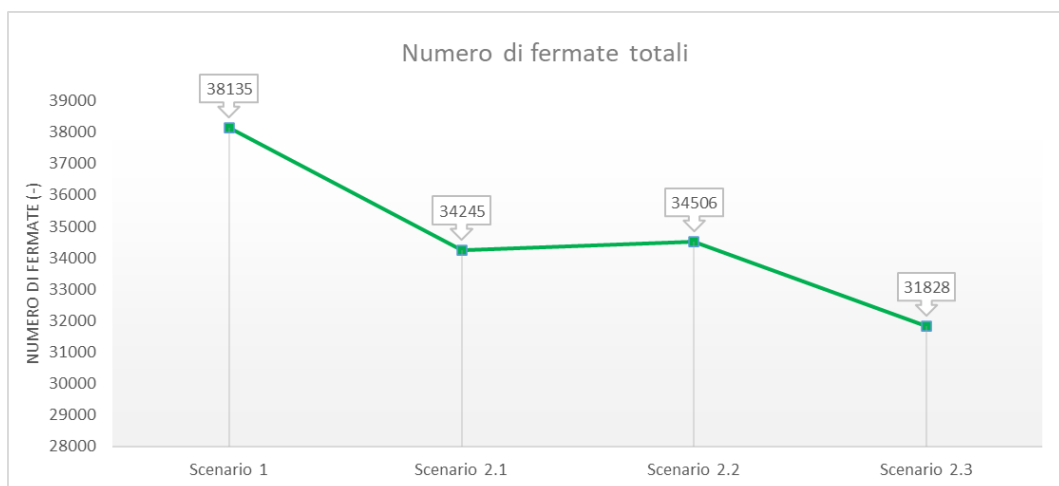
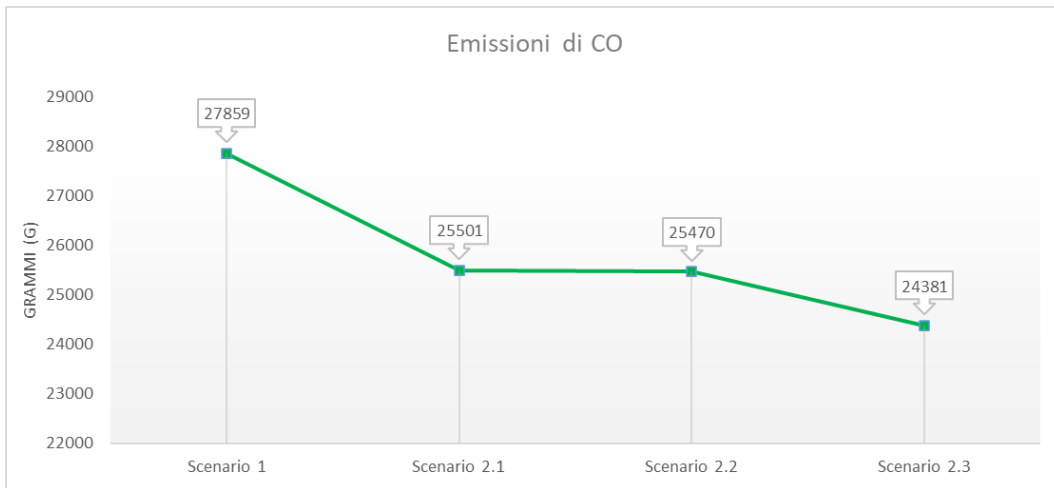
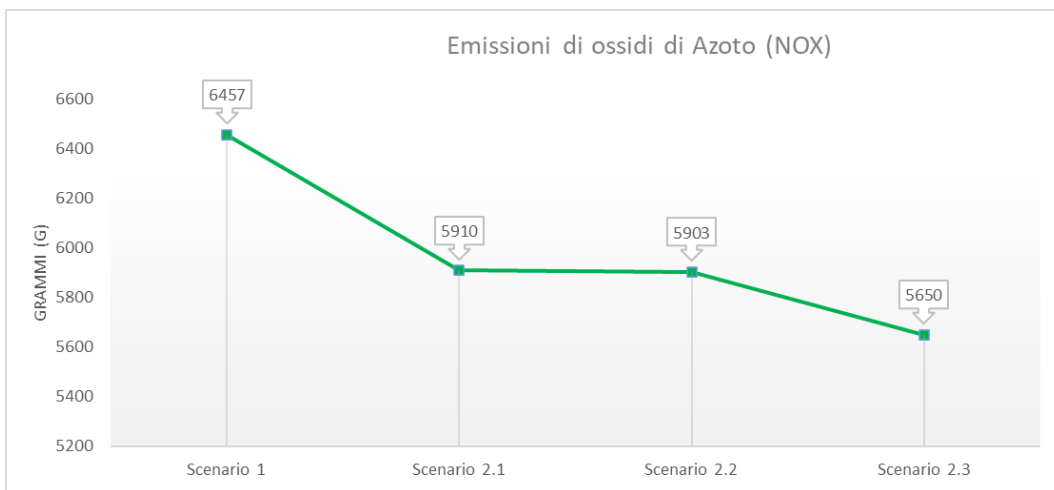


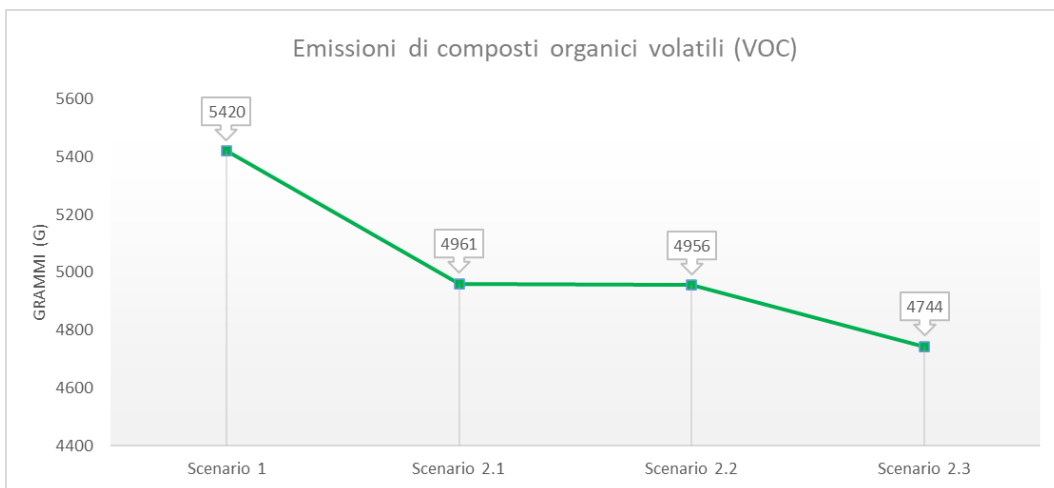
figura 96 numero totale di fermate, nodo di Porta Maggiore



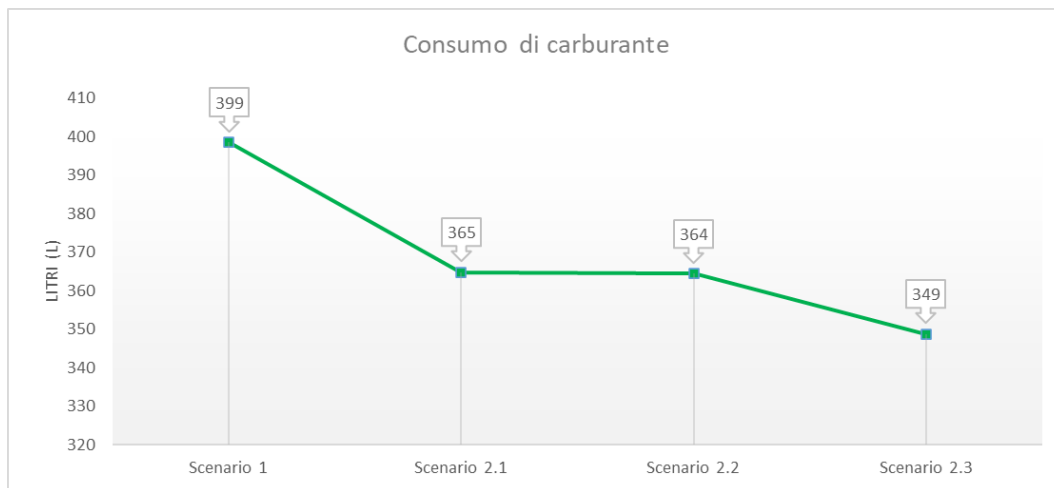
*figura 97 emissioni di CO, nodo di Porta Maggiore*



*figura 98 emissioni di NOX, nodo di Porta Maggiore*



*figura 99 emissioni di VOC, nodo di Porta Maggiore*



*figura 100 consumo di carburante, nodo di Porta Maggiore*

## 6.6.2 Impatto sui tempi di attesa degli attraversamenti pedonali

La modifica dei piani semaforici e della durata delle fasi dedicate al traffico veicolare può portare ad effetti negati sul traffico pedonale. La gravità della condizione del traffico veicolare ha portata a privilegiare quest'ultima, ma con la presente analisi si vuole quantificare quanto sia in effetti il danno arrecato alle categorie di utenza debole, in particolare ai pedoni.

Sono state quindi considerate le intersezioni centrali di Piazzale Labicano e Piazza di Porta Maggiore. Le fasi pedonali conservano la loro posizione all'interno dei piani semaforici nonostante le modifiche apportate alla durata dei cicli semaforici. In particolare, i gruppi segnale relativi alle fasi pedonali sono riassunte nelle seguenti tabelle e rappresentate nelle successive figure.

No	Intersezione	Gruppo segnale
1	Piazza Porta Maggiore	SG 7
2	Piazza Porta Maggiore	SG 8

Tabella 48 gruppi segnale per attraversamenti pedonali, Piazza di Porta Maggiore

No	Intersezione	Gruppo segnale
1	Piazzale Labicano	SG 10
2	Piazzale Labicano	SG 11

Tabella 49 gruppi segnale per attraversamenti pedonali, Piazzale Labicano



figura 101 schema gruppi segnale per attraversamenti pedonali, Piazza di Porta Maggiore

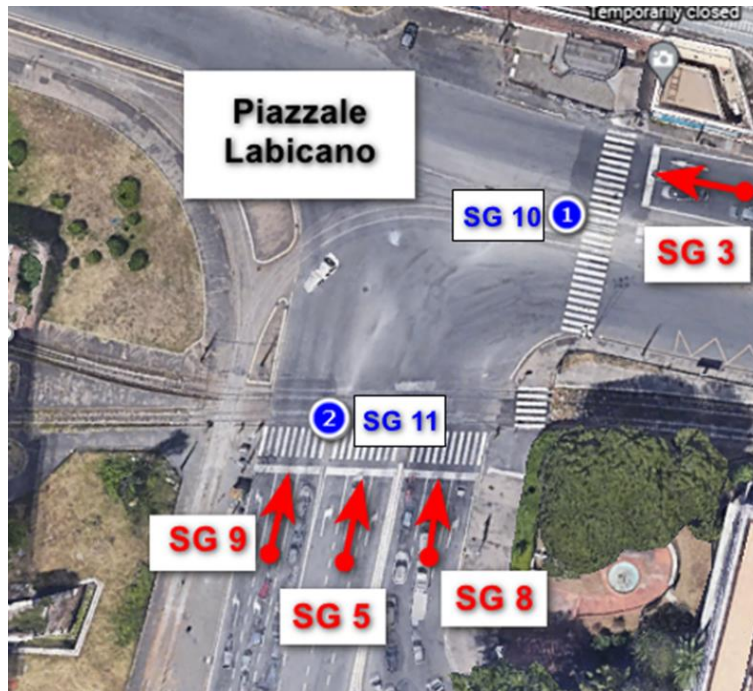


figura 102 gruppi segnale per attraversamenti pedonali, Piazzale Labicano

Le nuove durate di cicli e fasi influenzano il ritardo. I risultati sono presentati a seguire. Dettagli sulle formule utilizzate sono presenti in Appendice B.

Piazza Porta Maggiore										
Scenario	SG	verde (s)	rosso (s)	giallo (s)	ciclo (s)	N cicli (-)	ritardo medio per ciclo (s)	Ritardo totale (s)	Differenza (%)	
Scenario 1	7	102	36	15	153	23	4	97	6,43%	
Scenari C	7	99	36	15	150	24	4	104		
Scenario 1	8	10	119	24	153	23	46	1064	-0,60%	
Scenari C	8	11	115	24	150	24	44	1058		

Tabella 50 impatto dei nuovi piani semaforici sulla categoria pedonale, Piazza di Porta Maggiore

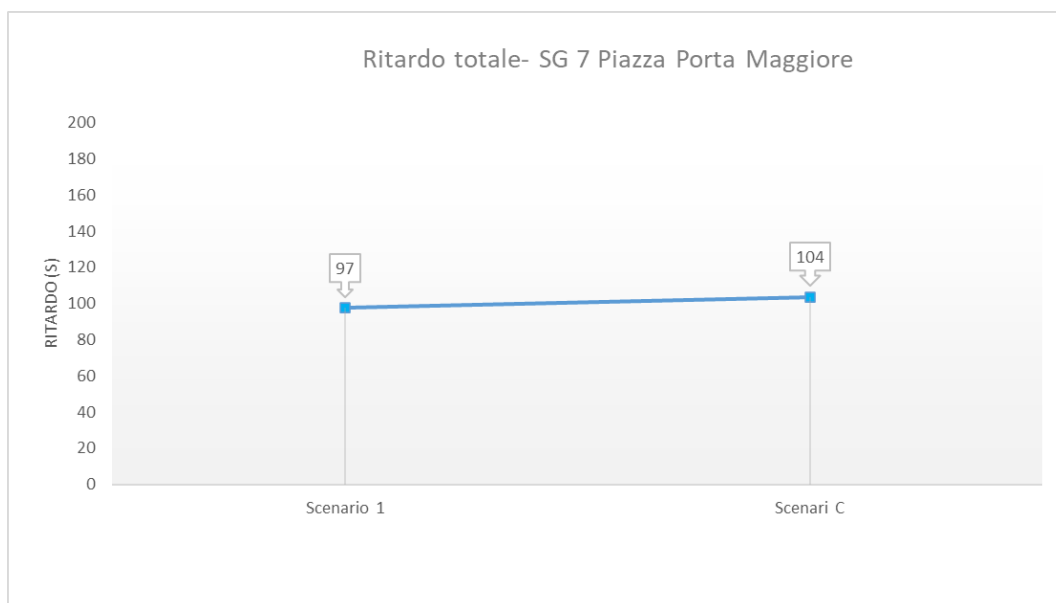


figura 103 ritardo pedonale, Piazza di Porta Maggiore SG 7

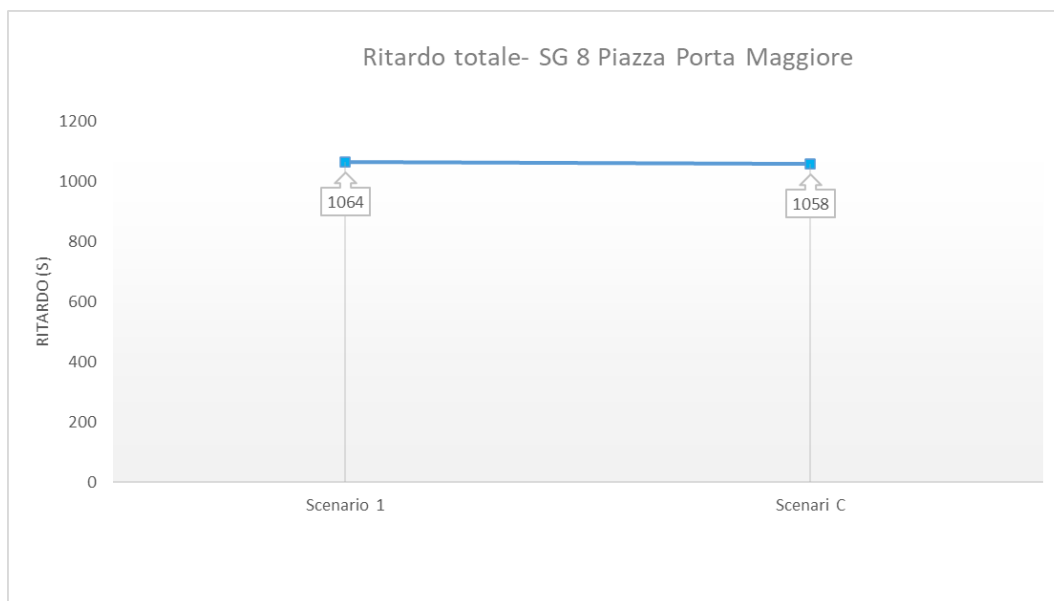


figura 104 ritardo pedonale, Piazza di Porta Maggiore SG 8

Piazzale Labicano									
Scenario	SG	verde (s)	rosso (s)	giallo (s)	ciclo (s)	N cicli (-)	ritardo medio per ciclo (s)	Ritardo totale (s)	Differenza (%)
Scenario 1	10	6	99	18	123	29	40	1155	-3,59%
Scenari C	10	14	118	18	150	24	46	1114	
Scenario 1	11	6	90	27	123	29	33	955	6,98%
Scenari C	11	10	113	27	150	24	43	1022	

Tabella 51 impatto dei nuovi piani semaforici sulla categoria pedonale, Piazzale Labicano

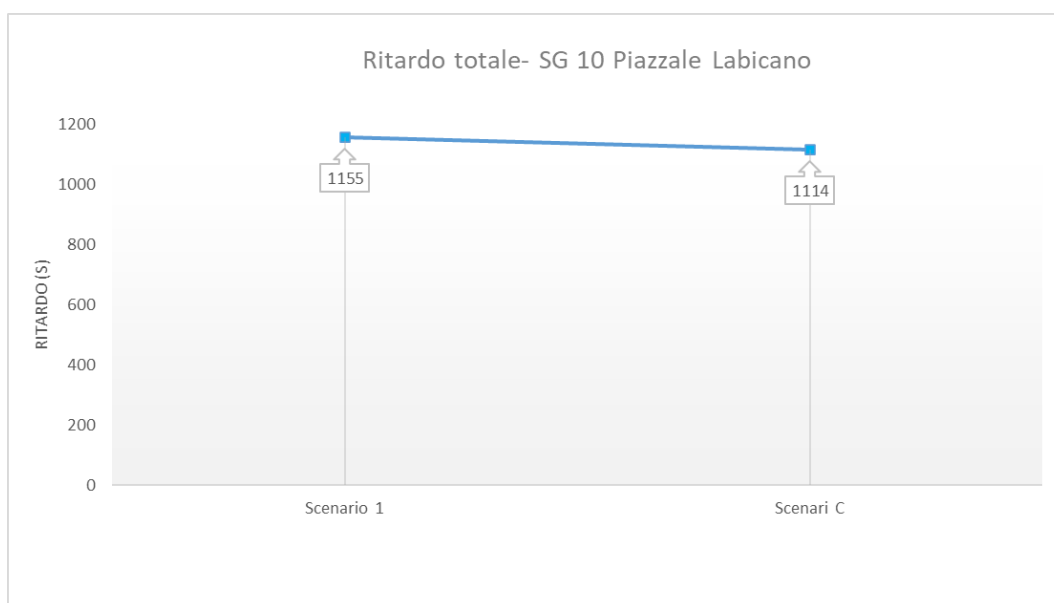


figura 105 ritardo pedonale, Piazzale Labicano SG 10



*figura 106 ritardo pedonale, Piazzale Labicano SG 11*

## 6.7 Stime del livello di servizio (Los)

Si riporta nel seguente capitolo il risultato dell'analisi relativa al Los (Level of Service). Tale parametro è un indicatore della qualità del deflusso riconosciuto a livello internazionale. L'HCM (High Capacity Manual) definisce nel dettaglio la procedura per il calcolo di tale indicatore. La procedura si distingue in particolare per l'esistenza nell'intersezione di controllo semaforico. Nel caso di intersezioni a raso con presenza di controllori, il parametro principale per il calcolo del Los è il Control Delay, ovvero il ritardo che le correnti veicolari accumulano per la presenza stessa del sistema di controllo.

Essendo il nodo di Porta Maggiore un'intersezione particolarmente complessa nella sua configurazione, con la presenza di cinque vie di accesso di cui quattro regolate con controllo semaforico, la definizione del perimetro per il calcolo del Los non è banale ed influenza il calcolo. È stato considerato come perimetro il poligono che circonda le linee di arresto presso gli accessi di Piazzale Labicano e Porta Maggiore, ad eccezione di Via dello Scalo San Lorenzo, dove non è presente regolazione. In quest'ultima il perimetro, dove posizionare il contatore finale per il calcolo del tempo di viaggio, è stato posto a valle del sovrappasso ferroviario dove il flusso si immette nelle corsie di Porta Maggiore, appena a monte della sezione gestita tramite priorità descritta nel capitolo "Affinamento del modello". Nella seguente figura 108 è evidenziato il perimetro e sono enumerate le correnti in accesso dove tramite i contatori del tempo di viaggio verrà derivato il ritardo.



figura 107 schema del nodo per il calcolo del LOS



Il ritardo di ciascuna corrente veicolare sarà quindi calcolato a partire dal tempo di viaggio ottenuto dalla simulazione, come valore medio sulle cinque simulazioni effettuate, ed il tempo di viaggio a vuoto, ovvero il tempo di percorrenza calcolato analiticamente con la velocità limite di 45 km/h e la distanza tra i contatori nota.

Per ogni scenario si ottengono quindi i ritardi delle cinque intersezioni, che pesati sul flusso indicano un ritardo medio ponderato dell'intero nodo. L'HCM fornisce delle tabelle con cui stimare il livello di servizio da questo valore di ritardo. (Figura 109)

LEVEL OF SERVICE	CONTROL DELAY PER VEHICLE (SEC/VEHICLES)
A	≤ 10
B	>10 and ≤ 20
C	>20 and ≤ 35
D	>35 and ≤ 55
E	>55 and ≤ 80
F	> 80

*figura 108 HCM Level of service criteria*

I valori ottenuti sono presentati nelle tabelle seguenti, dove è indicata la percentuale della domanda da matrice O/D considerata. Le tabelle complete con i valori di ritardo sono riportate in Appendice B.

Scenario	% domanda	LOS
Scenario 1	100%	F
Scenario 2.1		F
Scenario 2.2		F
Scenario 2.3		F

*Tabella 52 LOS nodo di Porta Maggiore con 100% della domanda*

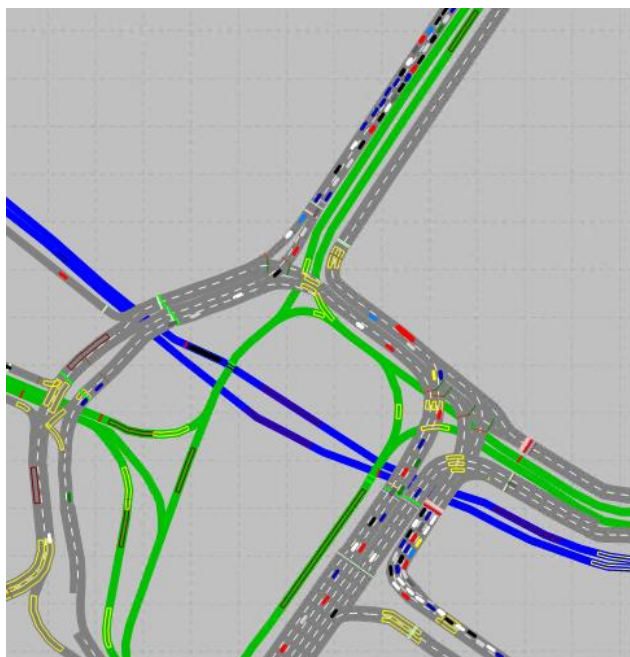
Scenario	% domanda	LOS
Scenario 1	90%	F
Scenario 2.1		F
Scenario 2.2		F
Scenario 2.3		F

*Tabella 53 LOS nodo di Porta Maggiore con 90% della domanda*

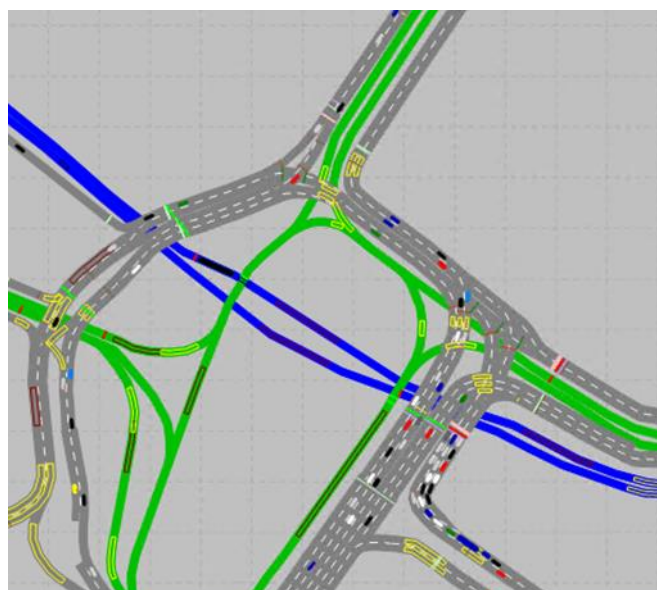
Scenario	% domanda	LOS
Scenario 1	80%	D
Scenario 2.1		C
Scenario 2.2		E
Scenario 2.3		C

*Tabella 54 LOS nodo di Porta Maggiore con 80% della domanda*

In generale il valore del Los conferma che lo scenario 2.3 apporta notevoli miglioramenti al deflusso. Le seguenti figure sono relative a tale scenario e mostrano come con una domanda leggermente ridotta, pari all'80%, via dello Scalo San Lorenzo sia praticamente priva di coda a differenza dello Scenario con 90% della domanda originale.



*figura 109 domanda 90% simulazione scenario 2.3 secondo 4000*



*figura 110 domanda 80% simulazione scenario 2.3 secondo 4000*

Dalla seconda immagine risulta altresì evidente come Via Casilina invece sia caratterizzata da coda anche con domanda ridotta. In particolare, analizzando il valore di ritardo pesato per il valore di flusso, Via Casilina è risultata essere l'accesso critico nel calcolo del Los, in particolare per gli scenari a domanda ridotta. Come scenario di "best case" è stata esplorata una simulazione degli scenari con una domanda del 5% rispetto all'originaria. Per tale domanda ci si aspetterebbe un ritardo praticamente trascurabile con un conseguente valore del Los pari alla categoria A: la coda e il conseguente ritardo in Via Casilina sbilanciano il ritardo dell'intersezione per cui si ottiene invece un Los B. Il caso seguente è presentato nelle tabelle.

Via di Accesso	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	ritardo pesato (s)
Via Prenestina	6	63	2
Via Casilina	47	49	10
Via Eleniana	0	50	0
Via dello Scalo San Lorenzo	0	69	0
Via di porta Maggiore	2	8	0

*figura 111 ritardo pesato sui flussi per via di accesso, Scenario 1*

Via di Accesso	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	ritardo pesato (s)
Via Prenestina	6	63	2
Via Casilina	47	49	10
Via Eleniana	0	50	0
Via dello Scalo San Lorenzo	0	69	0
Via di porta Maggiore	2	8	0

*figura 112 ritardo pesato sui flussi per via di accesso, Scenario 2.1*

Via di Accesso	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	ritardo pesato (s)
Via Prenestina	6	63	2
Via Casilina	47	49	10
Via Eleniana	0	50	0
Via dello Scalo San Lorenzo	0	69	0
Via di porta Maggiore	2	8	0

*figura 113 ritardo pesato sui flussi per via di accesso, Scenario 2.2*

Via di Accesso	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	ritardo pesato (s)
Via Prenestina	6	63	2
Via Casilina	47	49	10
Via Eleniana	0	50	0
Via dello Scalo San Lorenzo	0	69	0
Via di porta Maggiore	2	8	0

*figura 114 ritardo pesato sui flussi per via di accesso, Scenario 2.3*

I risultati evidenziano come con domanda fortemente diminuita, tutti i valori di ritardo scendano ad un valore costante, indipendente dallo scenario. È altresì chiaro che il ritardo in Via Casilina abbia un peso predominante nel calcolo del Los per il nodo. Osservando lo Scenario 2.3 con domanda 80%, ed in generale il valore assoluto del ritardo pesato negli altri casi, è evidente come la strategia

implementata in effetti migliori il livello di servizio dell'intersezione rispetto allo stato di fatto. Per aumentare la qualità del deflusso andrebbe mitigato il flusso proveniente da tale arteria, evitando la formazione di code eccessive e il conseguente aumento critico del ritardo.

## 7 Conclusioni

L'obiettivo principale dello studio è stato di sperimentare tecniche di ottimizzazione della gestione semaforica e di valutare con il supporto della simulazione del traffico gli effetti per la circolazione stradale. Successivamente ad una prima fase di configurazione e affinamento del modello di simulazione del traffico con approccio microscopico, è stata analizzata la domanda di mobilità di interesse per l'area di studio, considerando i valori medi orari, in base a studi precedenti. Infatti, la mancanza di un sistema di monitoraggio del traffico continuo e sufficientemente esteso per le vie di interesse, non ha permesso di simulare scenari più articolati con domanda variabile.

La matrice O/D dei dati storici relativi ai giorni feriali della settimana è stata fornita ed i flussi sono quindi stati calibrati nelle tre sezioni dotate di sistemi di rilevamento veicoli, per valutare il generale fattore di riduzione durante la pandemia Covid-19 (consideratasi valida tuttora), nello scenario di Porta Maggiore, oggetto di analisi.

Sono quindi stati individuati due scenari di domanda: il picco orario mattutino, risultato essere lo scenario critico, ed un picco orario pomeridiano. Nella Tesi è stato studiato il primo scenario.

Dall'analisi dallo stato di fatto è risultato evidente che la gestione con cicli semaforici di durata differente non permette di attuare la coordinazione tra movimenti successivi nel nodo, ostacolando il deflusso e causando importanti fenomeni di coda. Inoltre, è risultato che due arterie di accesso al nodo siano particolarmente critiche. Per i livelli di domanda presente Via dello Scalo San Lorenzo e Via Casilina risultano affette da persistente saturazione e fenomeni di coda molto importanti, che caratterizzano il 90% della lunghezza delle arterie stesse. Per quanto riguarda Via Casilina, la causa di tale criticità è risultata essere la troppo limitata durata della fase di verde che limitava la portata di saturazione per ciclo semaforico (gruppo segnale SG8, Piazzale Labicano). In via dello Scalo San Lorenzo la criticità risulta essere la geometria stessa dell'accesso al nodo, in quanto non è presente regolazione semaforica ed il flusso entra in conflitto con il flusso circolatorio del nodo proveniente da Piazzale Labicano.

La limitata portata di saturazione di Via Casilina è quindi stata risolta con una estensione di fase (verde) che aumenta appunto la portata stessa, mentre per Via dello Scalo San Lorenzo l'unica soluzione implementabile è stata l'allungamento della fase di verde presente a valle dell'accesso, cioè la fase di verde del gruppo segnale SG1 di Piazza di Porta Maggiore, aumentando la durata della finestra di inserimento nel flusso circolatorio dei veicoli dalla suddetta via.

Per aumentare le prestazioni del nodo, a valle di questi due specifici interventi, i cicli semaforici sono stati modificati in durata, con cicli maggiori da 150 secondi e cicli minori di 75 secondi. In questo modo la coordinazione può attuarsi ad ogni ciclo\cicli alterni. Sono stati poi individuati i cammini principali, anche detti corridoi, che i flussi veicolari percorrono partendo dalle intersezioni adiacenti

al nodo di Porta Maggiore fino al totale attraversamento del nodo stesso. La coordinazione è quindi stata creata tra gruppi segnali successivi, per creare fenomeni di onda verde tra i movimenti principali. Calibrando la durata delle fasi, con i vincoli imposti dalle condizioni critiche di Via dello Scalo San Lorenzo e Via Casilina, notevoli miglioramenti si sono raggiunti nel terzo scenario studiato, lo Scenario 2.3. I risultati mostrano in modo evidente come la strategia di ottimizzazione implementata aumenti in modo significativo le prestazioni del nodo. In particolare, le prestazioni aumentano per quattro delle cinque arterie di accesso: Via Casilina, Via dello Scalo San Lorenzo, Via Eleniana, Via di Porta Maggiore. Via Prenestina risulta l'unica arteria caratterizzata da un livello delle prestazioni analogo a quello dell'originale Scenario 1. Per garantire un deflusso maggiore da Via Casilina si è infatti ridotta la durata della fase di verde del gruppo segnale SG3 di Piazzale Labicano, dedicato al flusso di Via Prenestina. I parametri del traffico principali, quali ritardo, velocità media e lunghezza delle code si riducono per le restanti quattro arterie. Il rispetto dei vincoli imposti per le due arterie critiche si traduce in un aumento della domanda gestita in Via Casilina, dove il 100% dei veicoli attraversa interamente il tronco stradale, rispetto ad un originale rapporto del 82%. In Via dello Scalo, con le modifiche introdotte, la domanda simulata aumenta anch'essa raggiungendo un rapporto del 81% da un valore base del 77%. L'ottimizzazione ha quindi raggiunto gli obiettivi preposti, generando un lieve impatto negativo sul ritardo degli attraversamenti pedonali, che è inferiore al 7% (ritardo totale massimo in un'ora simulata, Piazzale Labicano, gruppo segnale SG11) rispetto alla condizione del sistema di gestione originale. Il ritardo totale dei veicoli simulati nel nodo in un'ora di picco mattutino diminuisce di un totale di 39 ore, considerando 4700 veicoli simulati in media, ovvero una diminuzione di ritardo medio per veicolo di 30 secondi nell'attraversamento del nodo. I risultati dimostrano come, anche per nodi con geometria complessa come quello di Porta Maggiore, l'ottimizzazione delle fasi semaforiche e il coordinamento dei movimenti tra intersezioni successive, apportino un notevole miglioramento alla circolazione stradale.

A livello di area, importanti miglioramenti sono ottenuti per quanto riguarda le emissioni ed i consumi di carburante, nonostante non fossero obiettivi primari dello studio. La diminuzione di tali parametri ambientali è correlata alla riduzione del numero di fermate, per le migliorate condizioni di deflusso che si ottengono con la nuova strategia.

Ulteriori sviluppi dello studio possono essere condotti per il futuro per verificare che la strategia proposta nello Scenario 2.3 dia risultati paragonabili anche con i diversi profili di domanda osservabile nella realtà. Per far ciò è necessario disporre di un sistema continuo di monitoraggio del traffico, in modo da ottenere scenari di domanda specifici e seguire l'evoluzione della domanda nel tempo. Come ulteriore evoluzione della regolazione proposta nello studio, interessanti miglioramenti potrebbero essere ottenuti implementando le fasi a chiamata per il trasporto pubblico, limitando

quindi il tempo del ciclo semaforico non usato quando il passaggio non coincide con la fase a tempo fisso dedicata, e riducendo leggermente le durate del ciclo. Con un sistema di monitoraggio automatico potrebbero essere inoltre definite differenti strategie di controllo e realizzato quindi un sistema di gestione del controllo semaforico a selezione di scenario.

## 8 Bibliografia

- [1] M. Papageorgiou, C. Kiakaki, V. Dinopoulou, A. Kotsialos, e Yibing Wang, «Review of road traffic control strategies», *Proc. IEEE*, vol. 91, n. 12, pagg. 2043–2067, dic. 2003, doi: 10.1109/JPROC.2003.819610.
- [2] R. Andronov e E. Leverents, «Effectiveness of adaptive control of traffic light intersection on isolated multi-lane intersections», *E3S Web Conf.*, vol. 110, pag. 02107, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201911002107.
- [3] «• Commercial vehicle sales worldwide 2020 | Statista». <https://www.statista.com/statistics/265902/worldwide-commercial-vehicle-sales/> (consultato apr. 28, 2021).
- [4] K. Wan, N. Nguyen, e V. Alagar, «Dependable Traffic Control Strategies for Urban and Freeway Networks», *Mob. Netw. Appl.*, vol. 21, n. 1, pagg. 98–126, feb. 2016, doi: 10.1007/s11036-016-0681-0.
- [5] H. Fan, «Exploration of Intelligent Traffic Control Network Strategy for Large-scale Traffic in Xiongan New Area», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1676, pag. 012213, nov. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1676/1/012213.
- [6] S. Hajiebrahimi e S. Iranmanesh, «An Adaptive Control Method of Traffic Signal-Timing under Emergency Situations for Smart Cities», in *2018 3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*, Singapore, set. 2018, pagg. 225–230. doi: 10.1109/ICITE.2018.8492592.
- [7] Y. Zhang, «Pedestrian-Safety-Aware Traffic Light Control Strategy for Urban Traffic Congestion Alleviation», *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 22, n. 1, pag. 16, 2021.
- [8] M. Olivari, «I. ELEMENTI DI CIRCOLAZIONE STRADALE», pag. 23.
- [9] M. Budzyński, L. Gumińska, Ł. Jeliński, e M. Kieć, «Pedestrian safety in road traffic – studies, recommendations and proposed improvements», *MATEC Web Conf.*, vol. 122, pag. 01002, 2017, doi: 10.1051/matecconf/201712201002.
- [10] M. A. Brown, «Traffic Control HOWTO», pag. 37.
- [11] L. Studer e M. Ketabdari, «Analysis of Adaptive Traffic Control Systems Design of a Decision Support System for Better Choices», *J. Civ. Environ. Eng.*, vol. 05, n. 06, 2015, doi: 10.4172/2165-784X.1000195.
- [12] C. Mallikarjuna, A. Phanindra, e K. R. Rao, «Traffic Data Collection under Mixed Traffic Conditions Using Video Image Processing», *J. Transp. Eng.*, vol. 135, n. 4, pagg. 174–182, apr. 2009, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2009)135:4(174).



- [13] S. Li, G. Li, Y. Cheng, e B. Ran, «Urban arterial traffic status detection using cellular data without cellphone GPS information», *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 114, pagg. 446–462, mag. 2020, doi: 10.1016/j.trc.2020.02.006.
- [14] J. J. Lamas-Seco, P. M. Castro, A. Dapena, e F. J. Vazquez-Araujo, «Multi-loop inductive sensor model for vehicle traffic applications», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 263, pagg. 580–592, ago. 2017, doi: 10.1016/j.sna.2017.06.020.
- [15] M. Perttunen, V. Kostakos, J. Riekkki, e T. Ojala, «Urban traffic analysis through multi-modal sensing», *Pers. Ubiquitous Comput.*, vol. 19, n. 3–4, pagg. 709–721, lug. 2015, doi: 10.1007/s00779-015-0833-4.
- [16] V. Kastrinaki, M. Zervakis, e K. Kalaitzakis, «A survey of video processing techniques for traffic applications», *Image Vis. Comput.*, vol. 21, n. 4, pagg. 359–381, apr. 2003, doi: 10.1016/S0262-8856(03)00004-0.
- [17] Montasir Abbas, Sherif Abdelaziz «*Evaluation of traffic responsive control on the reston Parkway Arterial network*», research report, 2009, Virginia Tech Transportation Institute

## **9 APPENDICE A: metodologie per il rilevamento dei dati**

La raccolta di dati relativi al deflusso in condizioni di traffico variabile è uno dei principali problemi affrontati dai ricercatori e dalle autorità che gestiscono il controllo del traffico. L'analisi del traffico dipende in modo critico dalla disponibilità dei dati osservati, e dalla qualità degli stessi, che influenza le decisioni come l'implementazione di una dedicata strategia di controllo. In ambiente di simulazione la disponibilità di dati validi permette la calibrazione del modello rispetto alla realtà: spesso la simulazione va corretta sia nella geometria del modello che per gli aspetti comportamentali degli utenti, per risultare rappresentativo del reale deflusso. [12]

Le attuali tecnologie per misurare lo stato del traffico possono essere generalmente classificate in due categorie: sistema di rilevamento di punti (sezioni) o sistema di rilevamento veicolare. Il rilevamento di punti, noto anche come rilevamento di posizione fissa, comporta l'installazione di apparecchiature in una sezione specifica, e l'utilizzo delle misure ottenute per stimare lo stato del traffico. [13] Il rilevamento veicolare è invece una metodologia che utilizza dispositivi mobili, come i veicoli sonda, e deriva le caratteristiche del traffico seguendone lo sviluppo in contemporanea.

Si analizzano di seguito i principali metodi per il rilevamento dei parametri del traffico in tempo reale, sottolineando gli aspetti critici e i vantaggi di ogni metodo analizzato.

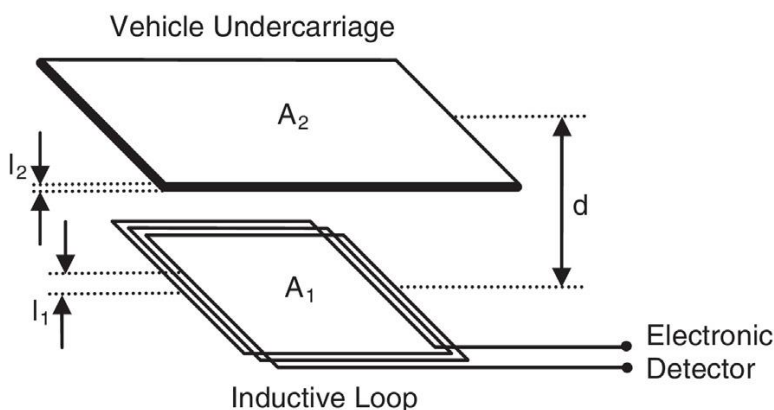
### **9.1 Metodi tradizionali**

Si definiscono tradizionali in quanto sono i metodi storicamente più utilizzati. La tecnologia è in continua evoluzione per cui anche questi metodi vengono aggiornati di continuo, soprattutto lato software e per adeguarsi alle tecnologie d'avanguardia.

#### **9.1.1 Spire induttive**

Costituiscono la tipologia di misurazione più utilizzata, e sono definite nella letteratura anglosassone come ILD (inductive loop detector). Gli anelli induttivi sono tipicamente installati sotto la superficie stradale e alimentati da un generatore di corrente, e utilizzano l'induzione elettromagnetica per rilevare i veicoli; questo fenomeno si verifica quando un circuito è sottoposto ad un campo magnetico variabile. È noto che un circuito percorso da corrente genera un campo magnetico, di direzione ed intensità dipendenti dalla forma del circuito, dal numero di avvolgimenti e dall'intensità di corrente. Un ILD è costituito da una o più bobine con uno o più avvolgimenti incorporati nella pavimentazione stradale; attraverso dei cavi si realizza il collegamento dalle bobine all'armadio di controllo, dove è presente il rilevatore elettronico. Il funzionamento completo è il seguente: un veicolo che si ferma o si muove sopra la bobina induce corrente, che riduce l'induttanza della bobina e provoca un cambiamento nella frequenza di oscillazione; in altre parole, il campo magnetico prodotto dalle spire

è influenzato dal passaggio di un oggetto metallico, che modifica la corrente. Questa differenza di potenziale è rilevata dal rilevatore elettronico, che associa un conteggio o uno stato di occupazione. Il veicolo costituisce quindi un secondo circuito, in moto rispetto a quello della spira, che genera a sua volta un campo magnetico, che si oppone a quello della spira e ne riduce l'induttanza. Si genera così un fenomeno di mutua induzione, per cui la coppia spira-veicolo agisce come un trasformatore (Figura 116).



*figura 115, schema di funzionamento di una spira ad induzione*

La geometria della bobina dipende dalla zona di rilevamento ma solitamente le forme rettangolari sono le più adeguate ai fini del rilevamento dei veicoli. [14]

Alcuni hardware e configurazioni avanzate sono in grado di rilevare anche la lunghezza di un veicolo, fornendo una classificazione approssimativa separando veicoli leggeri e pesanti. Configurando le intersezioni con le spire presso le corsie in accesso e in uscita (configurazione completa), i sensori possono identificare il traffico statico in attesa al semaforo, per effettuare una chiamata alle unità di controllo richiedendo l'attivazione della fase, e a valle misurare il flusso in uscita. Tale indicazione può incrementare la coordinazione della rete fornendo la previsione di flusso all'intersezione a valle, ed eventualmente effettuando una chiamata della fase al controllore a valle. [15] Questo aspetto è rilevante sia per il traffico privato che per i mezzi pubblici: avendo in generale una frequenza di passaggi minore, la fase dedicata al mezzo pubblico può essere richiesta esclusivamente per il passaggio prossimo, rilevato attraverso le spire installate ad una distanza appropriata, per coordinare l'arrivo del mezzo con l'attivazione della fase. In questo modo viene realizzata la priorità al trasporto pubblico.

La configurazione delle spire in accesso ed in uscita ad ogni ramo dell'intersezione permette anche a posteriori di derivare la matrice origine e destinazione per ciascun nodo a partire dai conteggi rilevati, e quindi fornire una base dati per la calibrazione di una matrice di rete. [12]

I problemi relativi alle spire sono l'alto costo per effettuare l'installazione (scavi), la manutenzione, gli errori di conteggio dovuti ai veicoli che non rispettano perfettamente le corsie durante il passaggio e la difficoltà nell'avere modelli che stimano velocità e flussi dai dati rilevati con buona qualità. [14]

## **9.2 Metodi innovativi**

### **9.2.1 Sensori Bluetooth**

La tecnologia Bluetooth è utile per catturare le traiettorie dei singoli veicoli, per calibrare ambienti di micro-simulazione e studiare in dettaglio i comportamenti degli utenti. Lo studio delle traiettorie è interessante in quanto può essere utilizzato per analizzare il comportamento spazio-temporale delle correnti di veicoli aggregando le traiettorie dei singoli mezzi, permettendo la costruzione della matrice origine/destinazione di rete. [15]

Tuttavia, come metodo può essere caratterizzato da diverse problematiche: i dispositivi Bluetooth possono funzionare in modalità non rilevabile. Ciò significa che solo un sottoinsieme di dispositivi Bluetooth esistenti è osservabile. Le stime ottenute in alcuni studi presenti in letteratura mostrano il rapporto tra i dispositivi Bluetooth osservabili e quelli non rilevati: nella città di Brema viene rilevato il 2 % dei dispositivi mentre in Inghilterra, a Bath, il 7 %. Questi dati indicano come in realtà il Bluetooth necessita del supporto di altre metodologie di rilevamento dati:[4] in letteratura sono indicati alcuni approcci di validazione incrociata che utilizzano altri dati di flusso aggregati, come quelli ottenuti da spire induttive. [15]

Al fine di fornire ulteriori esempi della incompletezza dei dati Bluetooth, i dispositivi iOS di Apple non sono in genere rilevabili, mentre i dispositivi Android recenti sono in genere rilevabili per una piccola finestra di tempo (pochi secondi). Nonostante i predetti limiti, il Bluetooth rimane molto utilizzato per il monitoraggio del traffico, soprattutto laddove la tempistica di viaggio e le possibili perturbazioni sono minori: nei casi di autostrade e arterie di trasporto extraurbane l'implementazione di scanner Bluetooth in posizioni strategiche consente di ottenere ottime stime dei tempi di spostamento. [15]

Una seconda problematica legata al Bluetooth, che condivide con i sensori wi-fi, è la presenza di dispositivi rilevati non appartenenti al traffico: utilizzando tali tecnologie per monitorare la mobilità urbana [1], si osservano problemi di distorsione demografica, dovuti all'alta concentrazione di dispositivi mobili appartenenti ad altre categorie, per esempio ai pedoni; gli stessi passeggeri di un veicolo possono concentrare più dispositivi, ciascuno con un identificativo univoco che viene rilevato continuamente. Questi falsi rilevamenti possono essere in parte filtrati attraverso algoritmi di riconoscimento, che stimano la distanza dei dispositivi dal sensore e filtrano i dati da scartare.

Il funzionamento dei sensori Bluetooth è semplice: ad ogni ciclo di scansione, i sensori registrano l'ID univoco dei dispositivi scoperti e l'istante di tempo in cui è stato rilevato. I dati sono inviati in tempo reale ad un server centrale dove i dati vengono salvati. I successivi rilevamenti dello stesso ID e dei tempi di in cui questo avviene forniscono in pratica i punti della traiettoria. Il server è poi implementato con un modello di aggregazione che aggrega tutti i dati dello studio con traiettoria simile e fornisce una matrice O/D. Questa, per i problemi di falsa rilevazione previamente descritti, va calibrata attraverso altre misurazioni, come conteggi in specifiche sezioni attraverso l'uso di spire induttive. [15]

La posizione di installazione dei dispositivi ideale è sui pali semaforici, conveniente perché sede con alimentazione costante (essendo il semaforo stesso alimentato), e che consente la protezione del dispositivo dagli atti vandalici. La loro posizione sopraelevata fornisce inoltre un ambiente privo di ostacoli per il rilevamento. [15]

### **9.2.2 Videocamere**

Spesso in letteratura questi strumenti vengono definiti anche come sensori video o spire virtuali. Il rilevamento e l'analisi dei veicoli attraverso l'elaborazione di immagini, a causa della sua natura non intrusiva, ha notevoli vantaggi e per cui dagli anni 90' si è osservata una sempre maggiore diffusione di questi sensori. [12]

Ulteriori vantaggi nell'uso di questa tecnologia sono la rapida frequenza di analisi, la facilità di installazione e le contenute spese per la manutenzione; questi strumenti hanno la capacità di monitorare ampie aree, riducendo il numero di installazioni per singola intersezione. Rispetto ad altri metodi, tra cui le spire induttive, il sonar e i rivelatori a microonde, che presentano gravi svantaggi essendo costosi da installare e da mantenere, sono in grado di rilevare veicoli lenti o fermi, capacità che i predetti strumenti invece non hanno. [16]

La ricerca, soprattutto nel campo informatico dedicato alle analisi del traffico, ha portato ad una ricchezza di metodi di elaborazione ed analisi video. In generale, i sistemi sviluppati devono integrare, tra gli altri compiti, il rilevamento automatico delle corsie e l'individuazione di ostacoli statici e/o in movimento (rilevamento di oggetti) all'interno dello spazio di interesse. [16]

Al contempo possono essere estratte dall'osservazione la traiettoria del veicolo e le molteplici grandezze derivabili: gli aspetti comportamentali del conducente, la classificazione dei veicoli (anche in condizioni di traffico misto) ([12]), la lunghezza della coda, il profilo del flusso di avvicinamento, la decelerazione del veicolo e la misurazione automatica dei movimenti di svolta. [16]

Con il rapido progresso nell'industria elettronica, la complessità computazionale non è più restrittiva per le applicazioni in tempo reale: la capacità del sistema di reagire al cambio continuo della scena

osservata, mentre realizza una varietà di obiettivi, è un aspetto fondamentale e questa importante caratteristica giustifica la diffusa sostituzione dei metodi tradizionali di raccolta dei dati di traffico con i sensori video. [16]

Vi sono tuttavia metodi di analisi anche in modalità offline: sono utilizzati soprattutto per ottenere la classificazione dei flussi rilevati, soprattutto per analisi in realtà soggette a traffico fortemente eterogeneo nella sua composizione. Tuttavia, sono tecniche dispendiose in termini temporali e che non sono utili per l'implementazione della gestione adattativa del traffico, per la quale è fondamentale una risposta in tempo reale. [12]

Per ottemperare ai predetti obiettivi, i sensori video devono includere la modalità di ricerca automatica delle corsie (ALF). Inoltre, il sistema deve adattarsi alle diverse condizioni ambientali. Per questo motivo si parla di visione attiva, ovvero una modalità di osservazione in cui l'angolo di visione della telecamera e la lunghezza focale dell'obiettivo della telecamera possono essere controllati dall'operatore del sistema, per trovare una visione ottimale in fase di configurazione.

Vi sono due approcci per il rilevamento automatico delle corsie ALF: il lane-region detection e il lane-border detection. Nel caso di un veicolo in movimento, il processo di riconoscimento della corsia deve essere ripetuto continuamente su una sequenza di immagini. Per accelerare il processo di rilevamento delle corsie, è necessario limitare il calcolo ad una regione di interesse ridotta (ROI: region of interest), per entrambi gli approcci. Il primo di questi (lane-region detection) limita la ricerca al percorso previsto del veicolo, definendo una regione di ricerca all'interno di un trapezio definito sul piano dell'immagine che corrisponde, attraverso la trasformata di prospettiva, alla regione spaziale reale sulla pavimentazione. Il secondo approccio (lane-border detection) definisce invece piccole finestre di ricerca situate nelle posizioni previste della corsia, rispettandone i limiti, separate da brevi distanze spaziali: il veicolo viene quindi seguito attraverso un corridoio con limiti predefiniti, e il cambio corsia può essere rilevato. [16]

Nel monitoraggio del traffico stradale, le telecamere di acquisizione video sono stazionarie: sono posizionate su pali in posizione elevata rispetto al suolo, per ottenere una visione ottimale della strada e dei veicoli di passaggio. [16]

Le tecniche di rilevazione sono molteplici: una tecnica utilizzata è la determinazione della diversa densità del veicolo rispetto allo sfondo, efficace per contrastare il cambio di ombre durante la giornata; una seconda tecnica sfrutta la suddivisione in griglia dell'area di interesse, con il riconoscimento delle celle di interesse e al loro interno una ricerca mirata dei pixels contenenti il veicolo. Un altro metodo, definito come "rilevamento dei confini", individua tutti gli oggetti tramite segmenti rettilinei: il modello mira a distinguere i profili complessi, che risultano essere i veicoli, da quelli più semplici e costanti, che risultano essere caratteristiche della strada quali banchine e

segnaletica. Quest'ultimo metodo non è influenzato dai cambi di luce, che possono portare errori nei metodi che analizzano le immagini tramite l'individuazione delle ombre. [12]

I metodi più moderni utilizzano l'analisi dell'impronta spaziale, che rileva la forma e le dimensioni attraverso l'associazione tra coordinate dello spazio 3D e quelle dell'immagine 2D. Questo processo viene fatto da un modello di proiezione, che trasforma l'oggetto 3D con le corrispondenti coordinate spaziali in oggetto 2D, con corrispondenti coordinate sul piano immagine. In alcuni software di analisi è possibile classificare i diversi veicoli utilizzando lo stesso approccio: le categorie di veicolo vengono predefinite da un insieme di grandezze (tipicamente geometriche) come altezza, larghezza e lunghezza del mezzo. Attraverso la stima delle coordinate spaziali dall'immagine 2D si risale quindi alla classe di appartenenza, solitamente attraverso un algoritmo di ricerca che analizzi le misure osservate, in modo da trovare la classe affine tra quelle previste nella libreria configurata in precedenza. [12]

I sensori video in generale offrono una più ampia e completa base dati. Ovviamente il loro costo per singolo strumento è maggiore, ma la possibile maggiore copertura che forniscono può comunque indicarli come scelta preferenziale. Inoltre, molte amministrazioni pubbliche sono attratte verso questo tipo di strumentazione per i minori costi di manutenzione e per la minore esposizione agli atti vandalici, grazie alla posizione sopraelevata rispetto al piano di passaggio dei veicoli. A differenza dei sistemi con spire induttive, la loro installazione non richiede lavori invadenti con interruzione del traffico.

### **9.2.3 Tracciamento satellitare \ eventi da dispositivi mobili**

Il metodo di rilevamento per punti è ampiamente utilizzato con buone prestazioni, ma necessita di numerosi rivelatori installati sull'infrastruttura (ad esempio, loop induttivi, telecamere, radar) per il monitoraggio del traffico. La copertura limitata e gli elevati costi di installazione, manutenzione e di funzionamento (alimentazione) di queste apparecchiature limita fortemente il loro uso. [13]

Il tracciamento dei dispositivi cellulari può sfruttare segnali che non derivano dalle informazioni satellitari oppure la localizzazione GPS. I metodi più diffusi che utilizzano segnali senza GPS sono quelli che sfruttano le informazioni ottenute dagli eventi di handoff (HO) e location update (LU), generati in ogni stazione cellulare.[13]

Servizi online come Google utilizzano invece informazioni da GPS per rilevare la velocità georeferenziata in tempo reale degli utenti Android, con la quale costruire un quadro delle condizioni del traffico sulla rete stradale. Quest'ultimo approccio può portare a risultati sottostimati poiché richiede dispositivi di fascia alta, che sono in genere non accessibili alla popolazione completa. [15]

La derivazione dei parametri del traffico, come velocità e flusso, è spesso dedotta grazie ai dati forniti dalle compagnie telefoniche. Soprattutto per i telefoni cellulari, la posizione e le azioni (eventi) effettuate utilizzando i dispositivi rende tracciabili gli stessi, e fornisce un metodo per analizzare lo spostamento delle persone e di conseguenza dei veicoli.

Esistono diverse tipologie di conteggio a partire dalle osservazioni dei telefoni mobili. I più diffusi, come descritto in precedenza, sono i conteggi corrispondenti ad un evento di LU (location update) o di HO (Handoff); questi due eventi possiedono specifiche frequenze che permettono di individuarli in modo univoco. Il processo di LU può essere innescato dalle seguenti azioni:

- Un cellulare viene acceso e si connette alla rete;
- Un cellulare si sposta da una zona di localizzazione (LA: location area) ad un'altra adiacente;
- Automatico aggiornamento di posizione: se un cellulare non ha alcuna attività per un lungo periodo di tempo, le informazioni sulla sua posizione saranno automaticamente aggiornate (il periodo di tempo soglia è determinato da ciascuna compagnia, ma di solito è di circa cinque minuti).

Le stime di velocità e flussi utilizzando questi “eventi” hanno però una precisione relativamente scarsa, con errori fino al 30% rispetto al dato osservato. Utilizzando algoritmi più complessi si può ridurre l'errore al 20%, come nell'esperimento condotto dalla compagnia telefonica americana AirSage (utilizzando eventi HO). I risultati migliori si ottengono in condizione sottosatura del traffico mentre durante la congestione l'errore cresce esponenzialmente. L'utilizzo di eventi cellulari per l'analisi del traffico è conveniente se l'area ha un'ottima copertura di segnale. Altri eventi che possono essere utilizzati, come riportato nella letteratura, sono l'ora di arrivo, l'angolo di arrivo, la differenza di ora di arrivo e il timing advance (TA). I primi tre dipendono dalla forza del segnale, quindi in generale sono caratteristiche instabili. Il TA è un termine di accesso multiplo a divisione temporale utilizzato nel sistema globale per la rete di comunicazione mobile. Corrisponde al tempo di trasferimento del segnale dal terminale mobile alla stazione cellulare. Quando il dispositivo attraversa i settori TA, l'ID cellulare e l'orario sono registrati. I risultati di alcuni casi studio hanno mostrato che l'errore relativo medio assoluto della velocità di traffico stimata con l'utilizzo degli eventi TA si riduce a circa il 15%. La stima del tempo di viaggio mostra che l'errore relativo di tempo di viaggio tra stima e osservazione è ancora più basso, entro il 10% (studio sul campo della compagnia americana AirSage).[13]

Come per il Bluetooth, anche per questi metodi la densità abitativa influenza la qualità del dato e la presenza di possibili false misure: i potenziali rumori per questi dati includono i dati da cellulare appartenenti a pedoni, lavoratori o persone negli edifici vicini, residenti intorno alle stazioni cellulari.

[13]

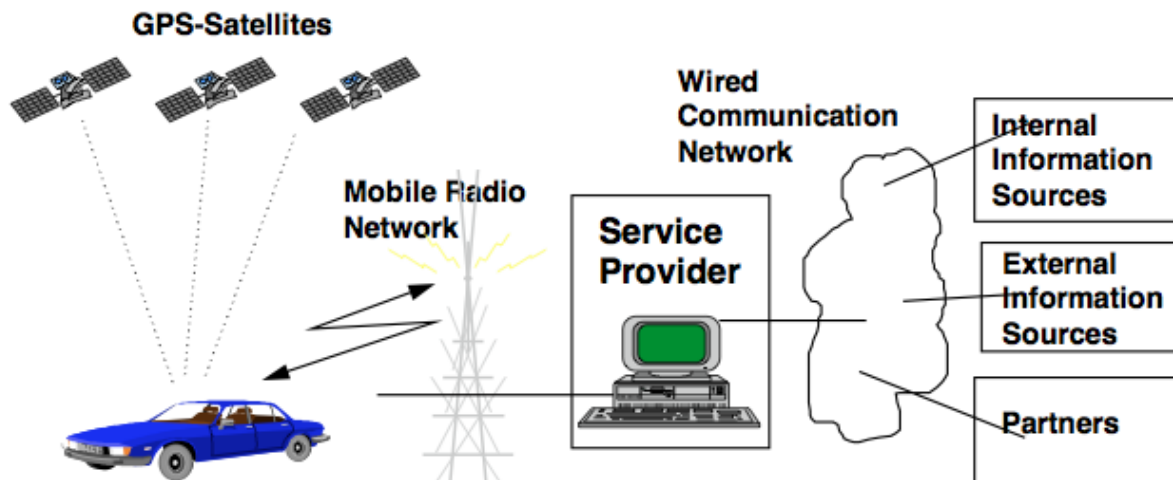


#### 9.2.4 Veicoli sonda

Un sistema basato sull'utilizzo di veicoli sonda utilizza le informazioni fornite dalla flotta di veicoli e trasmesse ad un sistema centrale di elaborazione dei dati: i veicoli inviano periodicamente i dati accumulati ad un server che gestisce un database spaziale, rappresentativo della rete stradale oggetto di analisi. Il server elabora le informazioni ricevute ed effettua il tracciamento dei veicoli sugli archi stradali, mettendo in correlazione le informazioni di posizione di ciascun veicolo con il grafo della rete. Un algoritmo di map-matching correla la posizione individuata attraverso i sensori (che devono essere presenti) con le coordinate della rete, comparando la traiettoria del veicolo con i percorsi configurati. Questo sottolinea la necessità di ulteriore sensoristica installata sulla rete. Lo spostamento viene costantemente comparato con i percorsi disponibili e il veicolo viene assegnato all'arco più probabile. La frequenza con cui vengono scambiate le informazioni dipende generalmente dal metodo di comunicazione. Le informazioni principali ottenute dal veicolo sonda sono il tempo medio di percorrenza e la velocità media; alcuni approcci innovativi rendono il sistema capace di prevedere le condizioni di traffico a breve termine, di rilevare automaticamente incidenti o situazioni critiche e di determinare i flussi origine-destinazione.

I veicoli sonda sono dotati di un dispositivo di rilevamento della posizione (GPS), un dispositivo di trasmissione (telefono cellulare) e un sistema centrale di elaborazione che si interfaccia con ambienti esterni tra i quali altre stazioni di misura. L'affidabilità delle stime dei tempi di percorrenza dipende essenzialmente dalla percentuale di veicoli sonda che partecipano al flusso di traffico, dalle condizioni di traffico e dalla capacità della strada. Di norma, un basso tasso di penetrazione di veicoli sonda è sufficiente in condizioni di traffico congestionato, mentre una percentuale più alta è necessaria per condizioni di traffico fluide (sottosaturazione).

Nella seguente figura 117 è fornita una rappresentazione schematica delle componenti tecnologiche del sistema.



*figura 116 componenti del sistema veicoli sonda-rete*

### 9.2.5 Informazioni dai Social Network

Alcuni metodi veramente innovativi sono stati sviluppati recentemente, ma essendo di scarso interesse nel presente studio saranno soltanto citati a titolo di completezza.

I ricercatori hanno recentemente preso in considerazione l'utilizzo di dati sociali condivisi, come fotografie pubblicate con annesso tag geografico, per ricostruire la mobilità urbana. Tuttavia, questi metodi soffrono la bassa densità spaziale e in contesti urbani di interesse turistico, i dati rilevati sono fortemente legati alla categoria dei visitatori, o comunque alla fascia giovane di popolazione che usa in modo più diffuso i social network (instagram, facebook, twitter). Per questi motivi la domanda di mobilità derivata può essere fortemente sottostimata. [15]

## 10 APPENDICE B

Sono riportati di seguito i grafici e le tabelle per ulteriori dettagli rispetto ai risultati già illustrati nel corpo dell'elaborato. Verranno anche riportati in dettaglio i procedimenti e le formule utilizzate per il calcolo di determinate grandezze, non incluse nei capitoli della tesi.

### 10.1 Calcolo degli offset e della percentuale di coordinazione

Note le successioni dei gruppi segnale da coordinare e le distanze tra le sezioni semaforizzate il tempo di offset base è calcolabile come:

$$\text{Tempo offset base (s)} = \frac{\text{Spazio (m)}}{\text{Velocità } \left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)} \times 3,6$$

Dove la velocità è quella limite di 45 km/h. Il valore dell'offset base è poi calibrato osservando una simulazione con domanda ridotta. Gli offset reali sono dedotti da quelli calibrati considerando la sequenzialità delle fasi di ciascun gruppo segnale. La seguente formula analitica è stata utilizzata:

$$\text{offset}_{\text{intersezione (N)}} = \text{Offset}_{\text{intersezione(N-1)}} - \text{Rosso SG}_{\text{intersezione (N)}} - \text{offset}_{\text{base}}$$

Dove le grandezze indicate sono in secondi e in particolare:

- L'intersezione (N) è quella in cui si vuole calcolare l'offset;
- L'intersezione (N-1) è quella che precede nella sequenza l'intersezione dove si vuole ottenere l'offset;
- Il tempo di rosso va considerato quando il SG inizia con una fase di rosso;

Gli offset reali considerano inoltre il concetto di "Tempo zero per cui Piazzale Labicano avrà un offset di zero secondi e le intersezioni adiacenti, di conseguenza, avranno un offset relativo. Il SG 3 è il gruppo segnale considerato per la coordinazione di Piazzale Labicano.

Essendo le durate delle fasi differenti, si analizzerà quale percentuale di coordinazione occorre garantire per raggiungere gli obiettivi preposti. La percentuale di coordinazione considererà la percentuale di verde che funziona secondo un meccanismo di onda verde dall'intersezione a monte verso quella a valle. Quando si parla invece di corridoio, la coordinazione sarà valutata come il minore valore di verde per cui la coordinazione è garantita a tutto il corridoio, rapportato al ciclo (in percentuale). In figura 118 e in tabella 49 è presentato un esempio di coordinazione con un ciclo e alcuni gruppi segnale casuali.

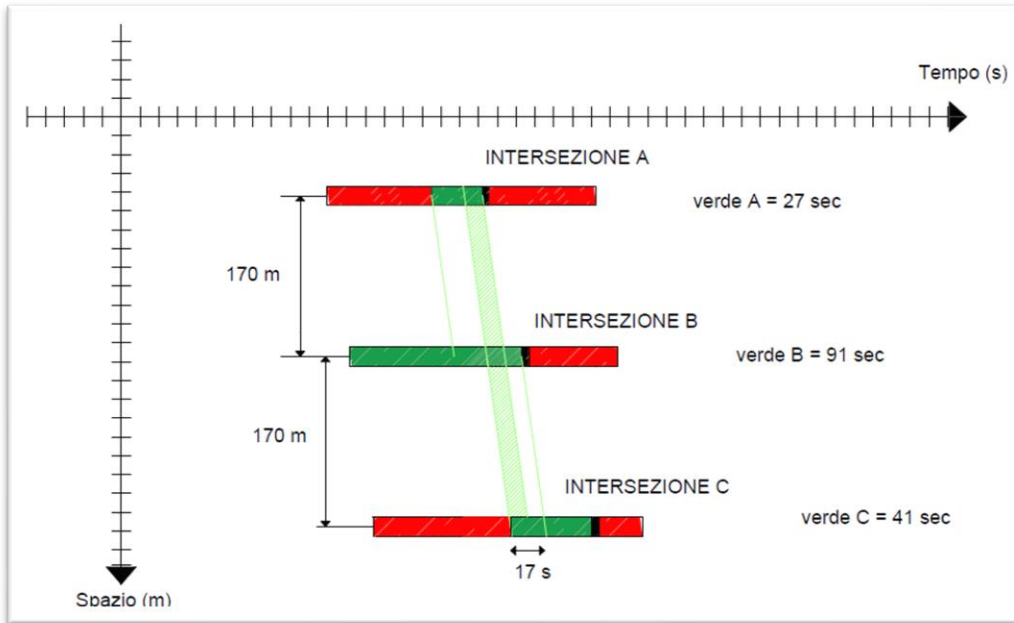


figura 117 esempio di calcolo del grado di coordinazione

INTERSEZIONE	Durata ciclo (s)	Fase di verde (s)
A	143	27
B	143	91
C	143	41
<b>A-B COORDINAZIONE AB</b>		
verde A (s)	27	100,00%
coordinato (s)	27	
<b>B-C COORDINAZIONE AB</b>		
verde B (s)	91	18,68%
coordinato (s)	17	
<b>A-B-C COORDINAZIONE CAMMINO</b>		
min verde (s)	27	62,96%
coordinato (s)	17	

Tabella 55 esempio di calcolo del grado di coordinazione

Il cammino può avere una coordinazione del 100 % soltanto per la durata del verde minimo di 27 secondi, che in questo caso però è coperta per soli 17 secondi. Agendo sull'offset della terza intersezione si potrebbe garantire la coordinazione massima.

## 10.2 Tempi di viaggio Scenario 1

Per ottenere un'indicazione puntuale del ritardo e del tempo di viaggio sono stati utilizzati i contatori di tempo di viaggio, denominati in ambiente Vissim come "Vehicle travel time collectors", configurando la coppia di contatori di inizio e fine per ottenere i tempi di viaggio medi tra le principali sezioni del nodo. La tabella 50 seguente contiene l'elenco completo dei tempi di viaggio stimati attraverso i contatori per ogni segmento configurato.

Contatore tempo di viaggio	Numero di veicoli ( )	Tempo di viaggio medio (s)	Distanza percorsa (m)
1 Deposito Atac Via Prenestina -Piazzale Labicano	1189	78,81	787,16
2 Via Prenestina Piazzale Labicano - Piazza porta maggiore	363	27,97	171,75
3 Prenestina Labicano-Via dello Scalo S. Lorenzo	92	13,92	122,57
4 Prenestina Labicano-Via Giolitti	398	40,28	206,05
5 Prenestina Labicano-Via Porta Maggiore	242	47,65	256,65
6 Prenestina Labicano-Via Stalilia	177	50,83	332,34
7 Prenestina Labicano-Via Eleniana	266	48,89	409,60
8 Prenestina Labicano-Via Casilina	7	64,44	501,95
9 Via Casilina-Piazzale Labicano	701	581,23	638,25
10 Via Casilina-Via dello Scalo S. Lorenzo	144	19,50	146,76
11 Via Casilina-Piazza Porta Maggiore	222	28,60	185,74
12 Via Casilina - Via Giolitti	325	34,62	218,90
13 Via Casilina-Via Porta maggiore	107	38,80	263,47
14 Via Casilina-Via Stalilia	68	46,77	337,05
15 Via Casilina-Via Eleniana	52	49,05	423,07
16 Via Eleniana-Corsie Piazzale Labicano	959	42,83	327,96
17 Via Eleniana-Via Casilina	105	30,78	339,55
18 Via Eleniana-Via Prenestina	257	53,45	411,86
19 Via Eleniana-Via dello Scalo S. Lorenzo	541	114,98	492,07
20 Via Eleniana-Via Giolitti	94	131,87	569,30
21 Via Eleniana-Via Porta Maggiore	28	117,91	612,99
22 Via Eleniana-Via Stalilia	29	125,12	686,98
23 Via dello Scalo S. Lorenzo: Inizio-fine	-	-	-
24 Via dello Scalo S. Lorenzo-Piazza Porta Maggiore	-	-	-
25 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Giolitti	-	-	-
26 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Porta Maggiore	-	-	-
27 Via dello Scalo S. Lorenzo -Via Stalilia	-	-	-
28 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Eleniana	-	-	-
29 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Casilina	-	-	-
30 Via dello Scalo S. Lorenzo -Via Prenestina	-	-	-
31 Via Prenestina Piazzale Labicano- Piazza Porta Mggiore	732	37,26	180,13
32 Via Casilina-Piazza Porta Maggiore	324	32,00	194,27
33 Via dello Scalo S. Lorenzo -Piazza Porta Maggiore	-	-	-

Tabella 56 tempi di viaggio tra sezioni nel nodo di Porta Maggiore, Scenario 1

### 10.3 Tempi di viaggio Scenario 2.1

La tabella 51 seguente contiene l'elenco completo dei tempi di viaggio stimati attraverso i contatori per ogni segmento configurato.

Contatore tempo di viaggio	Numero di veicoli (l)	Tempo di viaggio medio (s)	Distanza percorsa (m)
1 Deposito Atac Via Prenestina -Piazzale Labicano	1183	82,12	787,16
2 Via Prenestina Piazzale Labicano - Piazza porta maggiore	362	22,93	171,75
3 Prenestina Labicano-Via dello Scalo S. Lorenzo	91	14,01	122,57
4 Prenestina Labicano-Via Giolitti	397	35,87	206,05
5 Prenestina Labicano-Via Porta Maggiore	243	42,21	256,65
6 Prenestina Labicano-Via Statilia	176	46,33	332,32
7 Prenestina Labicano-Via Eleniana	267	42,83	409,60
8 Prenestina Labicano-Via Casilina	7	61,71	501,95
9 Via Casilina-Piazzale Labicano	771	445,48	638,25
10 Via Casilina-Via dello Scalo S. Lorenzo	159	18,65	146,76
11 Via Casilina-Piazza Porta Maggiore	249	47,82	185,74
12 Via Casilina - Via Giolitti	346	55,30	218,90
13 Via Casilina-Via Porta maggiore	117	57,24	263,47
14 Via Casilina-Via Statilia	76	66,60	337,05
15 Via Casilina-Via Eleniana	56	70,03	423,07
16 Via Eleniana-Corsie Piazzale Labicano	968	42,56	327,96
17 Via Eleniana-Via Casilina	106	31,44	339,55
18 Via Eleniana-Via Prenestina	257	48,73	411,86
19 Via Eleniana-Via dello Scalo S. Lorenzo	547	105,67	492,07
20 Via Eleniana-Via Giolitti	94	132,09	569,30
21 Via Eleniana-Via Porta Maggiore	28	122,65	612,99
22 ViaEleniana-Via Statilia	29	126,24	686,98
23 Via dello Scalo S. Lorenzo: Inizio-fine	-	-	-
24 Via dello Scalo S. Lorenzo-Piazza Porta Maggiore	-	-	-
25 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Giolitti	-	-	-
26 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Porta Maggiore	-	-	-
27 Via dello Scalo S. Lorenzo -Via Statilia	-	-	-
28 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Eleniana	-	-	-
29 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Casilina	-	-	-
30 Via dello Scalo S. Lorenzo -Via Prenestina	-	-	-
31 Via Prenestina Piazzale Labicano- Piazza Porta Mggiore	730	33,64	180,13
32 Via Casilina-Piazza Porta Maggiore	346	51,86	194,27
33 Via dello Scalo S. Lorenzo -Piazza Porta Maggiore	-	-	-

Tabella 57 tempi di viaggio tra sezioni nel nodo di Porta Maggiore, Scenario 2.1

## 10.4 Tempi di viaggio Scenario 2.2

La tabella 52 seguente contiene l'elenco completo dei tempi di viaggio stimati attraverso i contatori per ogni segmento configurato.

Contatore tempo di viaggio	Numero di veicoli (l)	Tempo di viaggio medio (s)	Distanza percorsa (m)
1 Deposito Atac Via Prenestina -Piazzale Labicano	1161	124,39	787,16
2 Via Prenestina Piazzale Labicano - Piazza porta maggiore	358	28,54	171,75
3 Prenestina Labicano-Via dello Scalo S. Lorenzo	90	13,99	122,57
4 Prenestina Labicano-Via Giolitti	387	53,61	206,05
5 Prenestina Labicano-Via Porta Maggiore	237	58,87	256,65
6 Prenestina Labicano-Via Statilia	175	56,20	332,32
7 Prenestina Labicano-Via Eleniana	260	49,08	409,60
8 Prenestina Labicano-Via Casilina	7	71,81	501,95
9 Via Casilina-Piazzale Labicano	759	461,36	638,25
10 Via Casilina-Via dello Scalo S. Lorenzo	158	18,63	146,76
11 Via Casilina-Piazza Porta Maggiore	244	56,29	185,74
12 Via Casilina - Via Giolitti	343	67,50	218,90
13 Via Casilina-Via Porta maggiore	115	66,60	263,47
14 Via Casilina-Via Statilia	74	74,02	337,05
15 Via Casilina-Via Eleniana	55	78,98	423,07
16 Via Eleniana-Corsie Piazzale Labicano	966	43,07	327,96
17 Via Eleniana-Via Casilina	106	31,06	339,55
18 Via Eleniana-Via Prenestina	257	48,52	411,86
19 Via Eleniana-Via dello Scalo S. Lorenzo	545	108,65	492,07
20 Via Eleniana-Via Giolitti	94	112,90	569,30
21 Via Eleniana-Via Porta Maggiore	28	107,16	612,99
22 ViaEleniana-Via Statilia	29	118,43	686,98
23 Via dello Scalo S. Lorenzo: Inizio-fine	-	-	-
24 Via dello Scalo S. Lorenzo-Piazza Porta Maggiore	-	-	-
25 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Giolitti	-	-	-
26 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Porta Maggiore	-	-	-
27 Via dello Scalo S. Lorenzo -Via Statilia	-	-	-
28 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Eleniana	-	-	-
29 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Casilina	-	-	-
30 Via dello Scalo S. Lorenzo -Via Prenestina	-	-	-
31 Via Prenestina Piazzale Labicano- Piazza Porta Mggiore	713	50,04	180,13
32 Via Casilina-Piazza Porta Maggiore	343	63,81	194,27
33 Via dello Scalo S. Lorenzo -Piazza Porta Maggiore	-	-	-

Tabella 58 tempi di viaggio tra sezioni nel nodo di Porta Maggiore, Scenario 2.2

## 10.5 Tempi di viaggio Scenario 2.3

La tabella 53 seguente contiene l'elenco completo dei tempi di viaggio stimati attraverso i contatori per ogni segmento configurato.

Contatore tempo di viaggio	Numero di veicoli (l)	Tempo di viaggio medio (s)	Distanza percorsa (m)
1 Deposito Atac Via Prenestina -Piazzale Labicano	1182	79,19	787,16
2 Via Prenestina Piazzale Labicano - Piazza porta maggiore	362	20,85	171,75
3 Prenestina Labicano-Via dello Scalo S. Lorenzo	91	13,96	122,57
4 Prenestina Labicano-Via Giolitti	396	34,78	206,05
5 Prenestina Labicano-Via Porta Maggiore	243	40,96	256,65
6 Prenestina Labicano-Via Statilia	175	44,46	332,32
7 Prenestina Labicano-Via Eleniana	267	40,65	409,60
8 Prenestina Labicano-Via Casilina	7	56,28	501,95
9 Via Casilina-Piazzale Labicano	770	437,65	638,25
10 Via Casilina-Via dello Scalo S. Lorenzo	159	18,49	146,76
11 Via Casilina-Piazza Porta Maggiore	247	43,75	185,74
12 Via Casilina - Via Giolitti	347	53,16	218,90
13 Via Casilina-Via Porta maggiore	118	52,46	263,47
14 Via Casilina-Via Statilia	75	63,04	337,05
15 Via Casilina-Via Eleniana	54	67,58	423,07
16 Via Eleniana-Corsie Piazzale Labicano	968	41,22	327,96
17 Via Eleniana-Via Casilina	106	31,51	339,55
18 Via Eleniana-Via Prenestina	257	49,11	411,86
19 Via Eleniana-Via dello Scalo S. Lorenzo	547	102,82	492,07
20 Via Eleniana-Via Giolitti	93	118,55	569,30
21 Via Eleniana-Via Porta Maggiore	28	110,65	612,99
22 ViaEleniana-Via Statilia	29	121,67	686,98
23 Via dello Scalo S. Lorenzo: Inizio-fine	-	-	-
24 Via dello Scalo S. Lorenzo-Piazza Porta Maggiore	-	-	-
25 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Giolitti	-	-	-
26 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Porta Maggiore	-	-	-
27 Via dello Scalo S. Lorenzo -Via Statilia	-	-	-
28 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Eleniana	-	-	-
29 Via dello Scalo S. Lorenzo-Via Casilina	-	-	-
30 Via dello Scalo S. Lorenzo -Via Prenestina	-	-	-
31 Via Prenestina Piazzale Labicano- Piazza Porta Mggiore	729	32,20	180,13
32 Via Casilina-Piazza Porta Maggiore	347	49,61	194,27
33 Via dello Scalo S. Lorenzo -Piazza Porta Maggiore	-	-	-

Tabella 59 tempi di viaggio tra sezioni nel nodo di Porta Maggiore, Scenario 2.3



## 10.6 Diagrammi t-x Scenario 2.2

I seguenti diagrammi mostrano come la coordinazione per questi gruppi segnale rimanga del 100%.

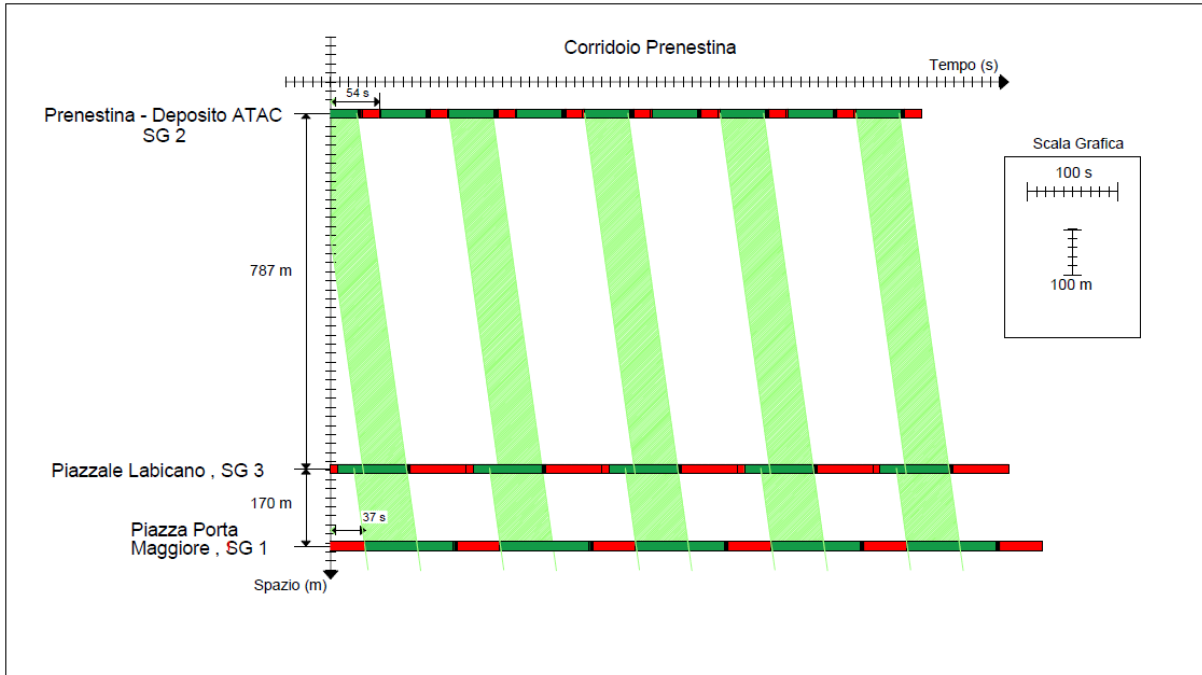


figura 118 coordinazione corridoio Prenestina, Scenario 2.2

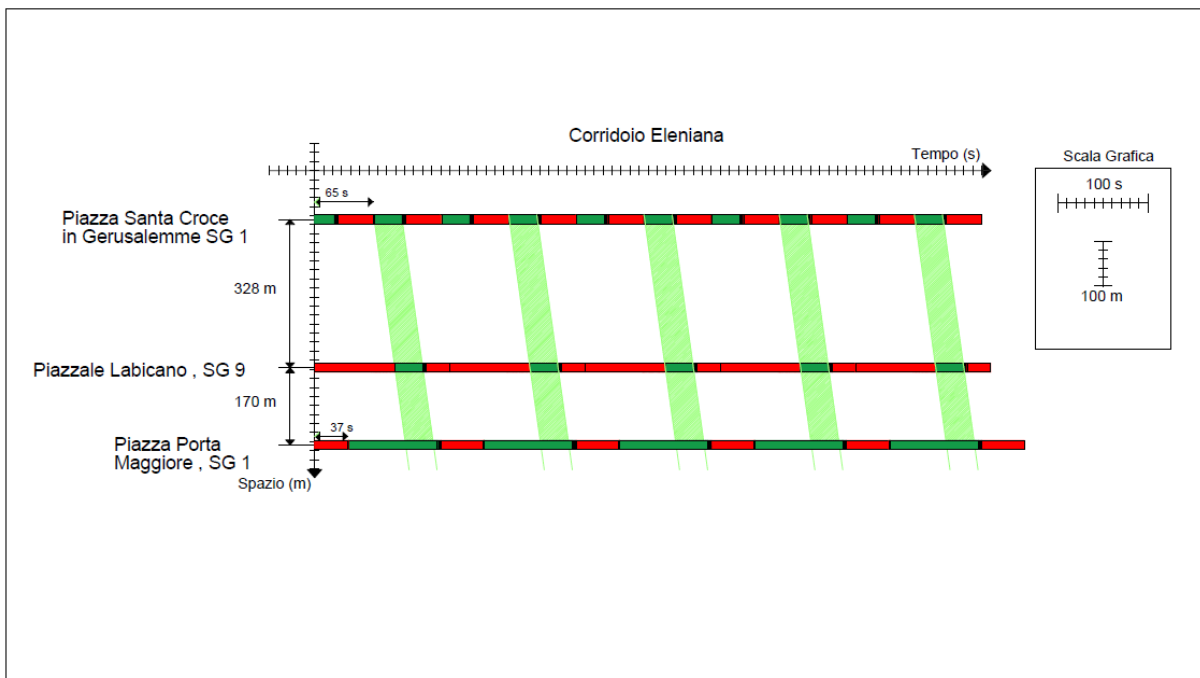


figura 119 coordinazione corridoio Eleniana, Scenario 2.2

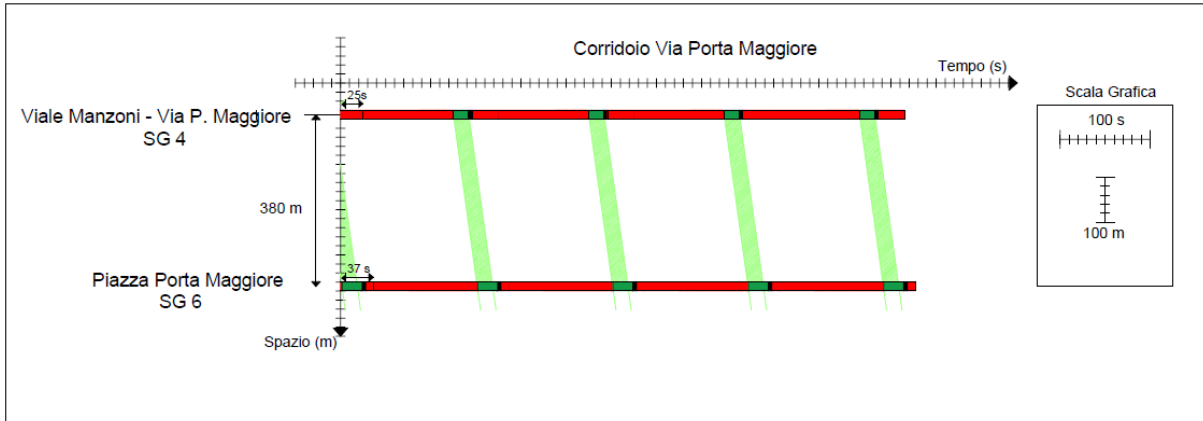


figura 120 coordinazione corridoio di Via di Porta Maggiore, Scenario 2.2

## 10.7 Diagrammi t-x Scenario 2.3

I seguenti diagrammi mostrano come la coordinazione per questi gruppi segnale rimanga del 100%.

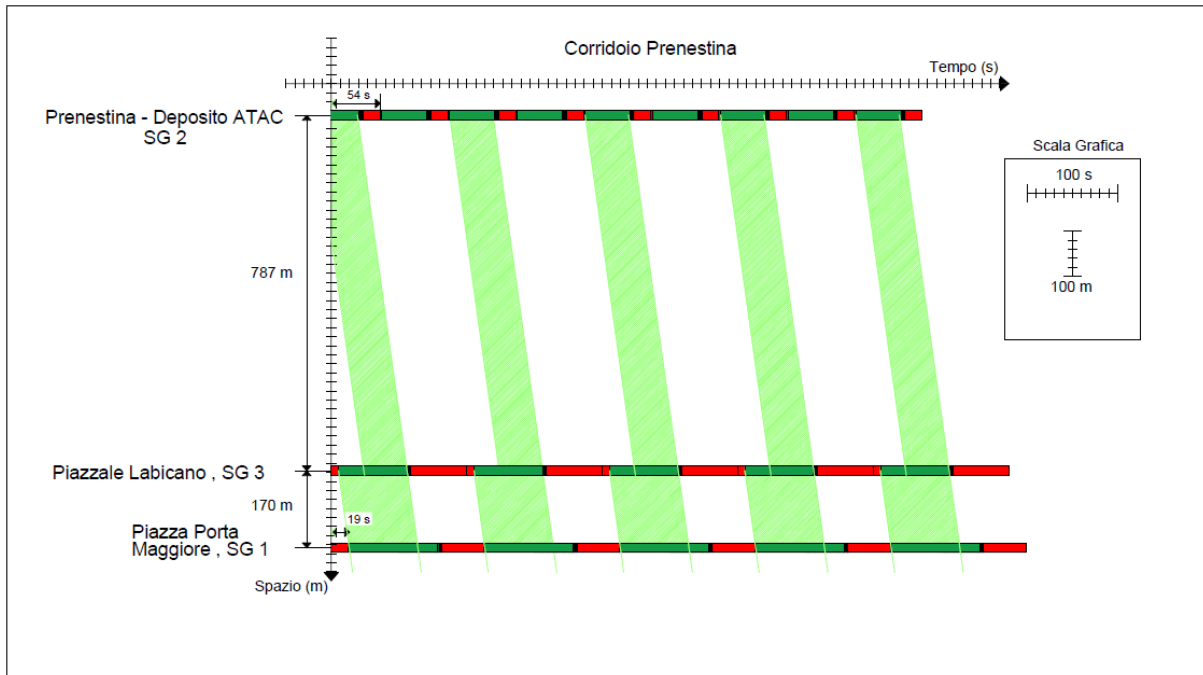


figura 121 coordinazione corridoio Prenestina, Scenario 2.3

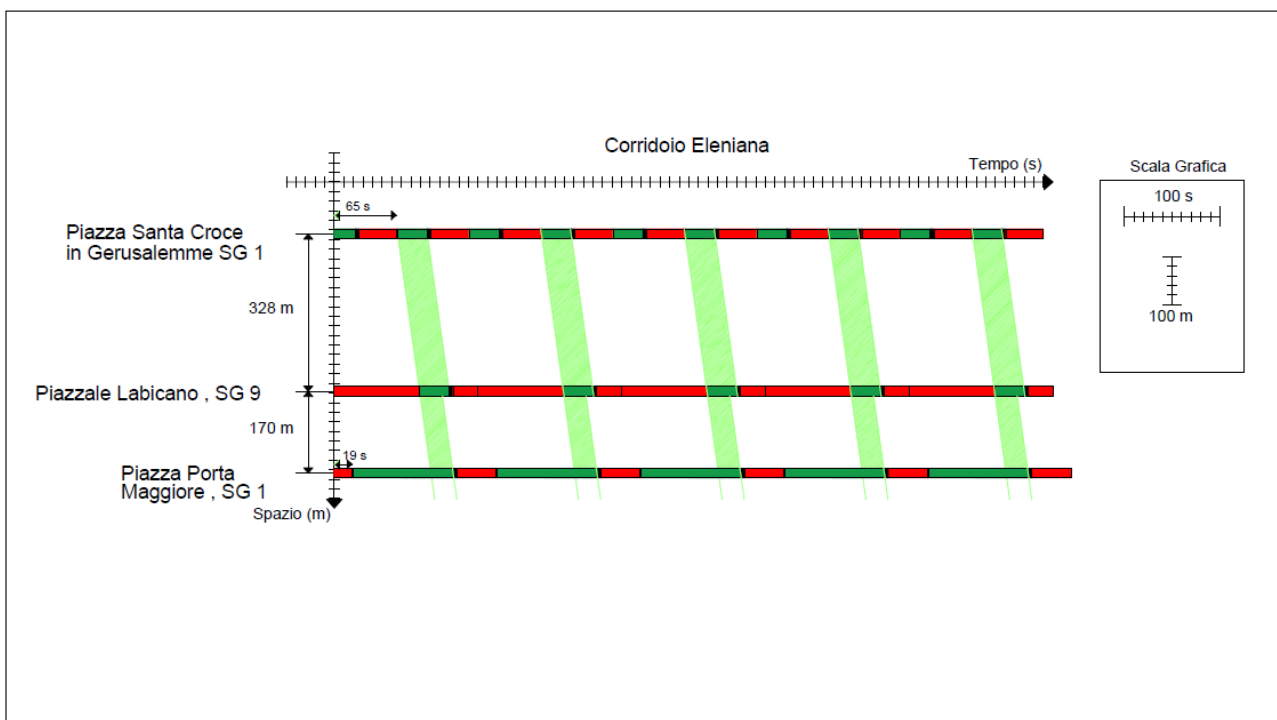


figura 122 coordinazione corridoio Eleniana, Scenario 2.3

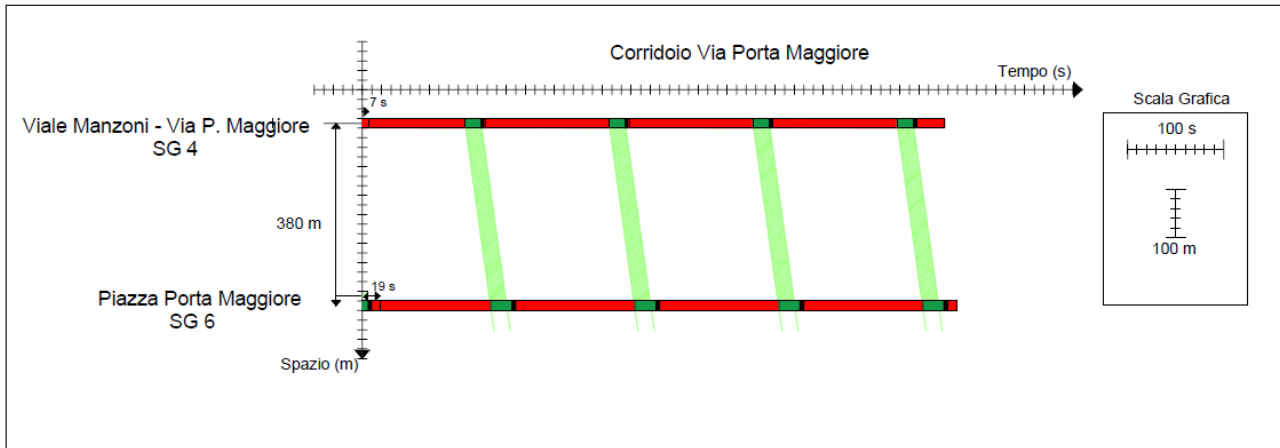


figura 123 coordinazione corridoio di Via di Porta Maggiore, Scenario 2.3

## 10.8 Calcolo del ritardo per il traffico pedonale

Il ritardo medio per i pedoni è stato calcolato con la formula semplificata:

$$Ritardo = \frac{R^2}{2C}$$

Dove:

- R è la durata della fase di rosso;
- C è la durata del ciclo semaforico;
- R/C esprime la probabilità che il pedone incontri la fase di rosso al suo arrivo presso l'attraversamento pedonale;
- R/2 esprime il ritardo medio, avendo un ritardo massimo pari ad R ed un minimo pari a zero;

## 10.9 Los

A seguire sono riportate nel dettaglio le tabelle con il valore del Los ottenuto per ciascuno scenario al variare della domanda. Il numero di veicoli della matrice O/D è stato infatti ridotto per valutare la sensibilità del parametro e per capire quale delle vie di accesso al nodo impatti maggiormente la qualità del deflusso del nodo stesso.

### 10.9.1 Domanda 100%

- Scenario 1:

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	Ritardo medio nel nodo (s)	LOS
Via Prenestina	79	63	16	1189	182	F
Via Casilina	581	51	530	701		
Via Eleniana	43	26	17	959		
Via dello Scalo San Lorenzo	349	39	310	1137		
Via di porta Maggiore	33	31	2	178		

Tabella 60 LOS scenario 1 (domanda 100%)

- Scenario 2.1:

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	Ritardo medio nel nodo (s)	LOS
Via Prenestina	82	63	19	1183	182	F
Via Casilina	445	51	394	771		
Via Eleniana	43	26	16	968		
Via dello Scalo San Lorenzo	439	39	400	1005		
Via di porta Maggiore	33	31	2	178		

Tabella 61 LOS scenario 2.1 (domanda 100%)

- Scenario 2.2:

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	Ritardo medio nel nodo (s)	LOS
Via Prenestina	124	63	61	1161	209	F
Via Casilina	461	51	410	759		
Via Eleniana	43	26	17	966		
Via dello Scalo San Lorenzo	516	39	477	894		
Via di porta Maggiore	33	31	2	181		

Tabella 62 LOS scenario 2.2 (domanda 100%)

- Scenario 2.3:

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	Ritardo medio nel nodo (s)	LOS
Via Prenestina	79	63	16	1182	148	F
Via Casilina	438	51	387	770		
Via Eleniana	41	26	15	968		
Via dello Scalo San Lorenzo	303	39	264	1103		
Via di porta Maggiore	33	31	2	181		

Tabella 63 LOS scenario 2.3 (domanda 100%)

## 10.9.2 Domanda 90 %

- Scenario 1:

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	Ritardo medio nel nodo (s)	LOS
Via Prenestina	77	63	14	1071	149	F
Via Casilina	398	51	346	706		
Via Eleniana	37	26	11	872		
Via dello Scalo San Lorenzo	310	39	271	1227		
Via di porta Maggiore	33	31	2	162		

Tabella 64 LOS scenario 1 (domanda 90%)

- Scenario 2.1:

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	Ritardo medio nel nodo (s)	LOS
Via Prenestina	78	63	15	1066	129	F
Via Casilina	262	51	211	763		
Via Eleniana	36	26	10	880		
Via dello Scalo San Lorenzo	328	39	290	1136		
Via di porta Maggiore	33	31	2	163		

Tabella 65 LOS scenario 2.1 (domanda 90%)

- Scenario 2.2:

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	Ritardo medio nel nodo (s)	LOS
Via Prenestina	94	63	31	1064	152	F
Via Casilina	272	51	221	753		
Via Eleniana	36	26	9	880		
Via dello Scalo San Lorenzo	418	39	380	1000		
Via di porta Maggiore	33	31	2	164		

Tabella 66 LOS scenario 2.2 (domanda 90%)

- Scenario 2.3:

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	Ritardo medio nel nodo (s)	LOS
Via Prenestina	77	63	14	1066	94	F
Via Casilina	261	51	210	763		
Via Eleniana	36	26	10	880		
Via dello Scalo San Lorenzo	200	39	162	1237		
Via di porta Maggiore	33	31	2	163		

Tabella 67 LOS scenario 2.3 (domanda 90%)

### 10.9.3 Domanda 80 %

- Scenario 1:

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	Ritardo medio nel nodo (s)	LOS
Via Prenestina	74	63	11	952	43	D
Via Casilina	227	51	176	685		
Via Eleniana	34	26	7	781		
Via dello Scalo San Lorenzo	59	39	21	1178		
Via di porta Maggiore	33	31	2	144		

Tabella 68 LOS scenario 1 (domanda 80%)

- Scenario 2.1:

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	Ritardo medio nel nodo (s)	LOS
Via Prenestina	75	63	12	948	33	C
Via Casilina	140	51	89	702		
Via Eleniana	34	26	8	784		
Via dello Scalo San Lorenzo	77	39	38	1175		
Via di porta Maggiore	33	31	2	147		

Tabella 69 LOS scenario 2.1 (domanda 80%)

- Scenario 2.2:

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	Ritardo medio nel nodo (s)	LOS
Via Prenestina	79	63	16	948	56	E
Via Casilina	135	51	84	702		
Via Eleniana	33	26	7	784		
Via dello Scalo San Lorenzo	150	39	111	1161		
Via di porta Maggiore	33	31	2	146		

Tabella 70 LOS scenario 2.2 (domanda 80%)

- Scenario 2.3:

Via di Accesso	Tempo viaggio medio (s)	Tempo di viaggio a vuoto (s)	Ritardo (s)	Veicoli rilevati (veh)	Ritardo medio nel nodo (s)	LOS
Via Prenestina	75	63	12	948	25	C
Via Casilina	137	51	86	702		
Via Eleniana	34	26	7	784		
Via dello Scalo San Lorenzo	54	39	15	1178		
Via di porta Maggiore	33	31	2	147		

Tabella 71 LOS scenario 2.3 (domanda 80%)

### 10.10 Sviluppi futuri: proposta sistema di monitoraggio

Per migliorare gli aspetti critici individuati durante l'analisi del nodo di Porta Maggiore, in particolare la insufficiente strumentazione che crea difficoltà nella stima delle matrici di domanda O/D, un pacchetto di soluzioni ITS per lo studio della mobilità è stato progettato e sottoposto ad RSM. Tale sistema di monitoraggio avrà come scopo principale la rilevazione della mobilità per configurare ed aggiornare i piani semaforici, al fine di costituire una libreria di piani dedicati per l'implementazione di una gestione a selezione di piano con riconoscimento dello scenario di traffico presente. La soluzione è stata progettata considerando il minor numero di strumenti sufficiente per soddisfare tale scopo, utilizzando ove possibile la strumentazione attualmente presente.

La soluzione utilizza tre telecamere già installate in corrispondenza delle intersezioni oggetto dello studio. Le tre telecamere presenti sono posizionate come riportato di seguito:



*figura 124 telecamera 10/11, Piazza di Porta Maggiore*



*figura 125 telecamera 10/12, Piazzale Labicano*



*figura 126 telecamera 10/13, Piazzale Labicano*



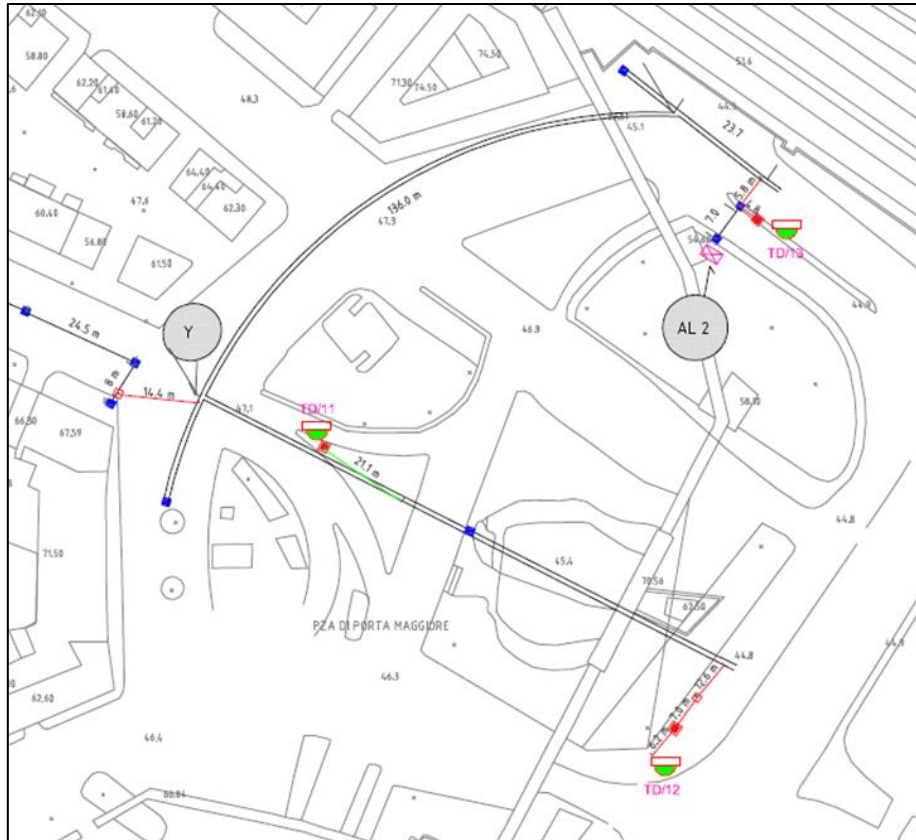


figura 127 planimetria della posizione delle telecamere istallate

Le telecamere saranno dedicate al rilevamento automatico di conteggio e classificazione degli oggetti (Bus, Auto, Scooter, Bici, Pedoni) che serviranno da base per le statistiche multimodali e per gli allarmi in tempo reale. Inoltre, i conteggi forniranno i volumi di ingresso. Pertanto, alle tre telecamere indicate, dovranno aggiungersi due ulteriori dispositivi.

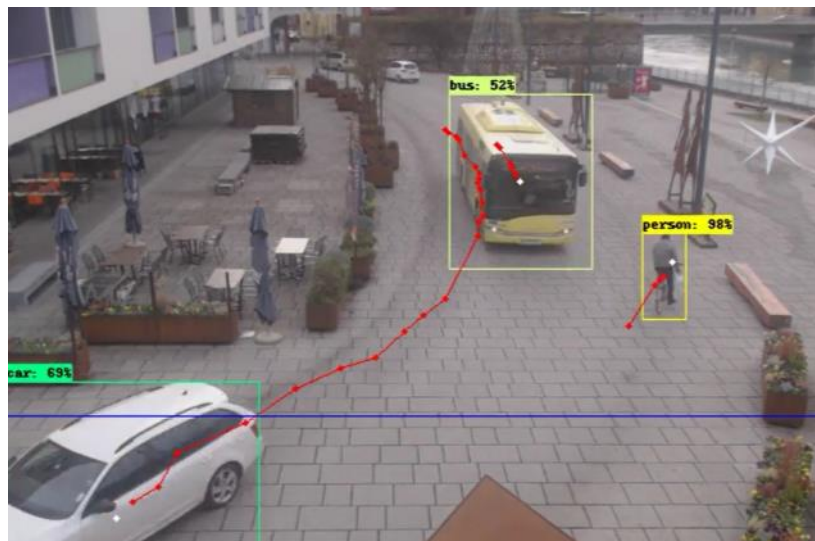


figura 128 rilevamento delle telecamere: categorizzazione dei flussi e conteggio

A completamento del sistema di telecamere presenti si propone una ulteriore telecamera ed un sistema di dispositivi bluetooth, installato per fornire le percentuali di svolta, costruite a partire dalle rilevazioni successive di identici MAC\_ID ( identificativo associato al dispositivo bluetooth rilevato). Durante lo studio della mobilità, infatti, il sistema di monitoraggio è risultato insufficiente per determinare in modo affidabile gli scenari di traffico. Con il sistema di dispositivi BT, una frazione di veicoli dotati di un dispositivo BT sarebbe rilevata, con l'associazione del MAC-ID (univoco); tramite quest'ultimo, si potrebbe ricostruire la sequenzialità di timestap rilevati durante il percorso. Essendo il nodo di Porta Maggiore un nodo con un flusso circolatorio ed entrate e uscite presso sezioni ben definite, sarebbe possibile sfruttare questi sistemi, per questo campione di veicoli rilevato, per risalire al percorso effettuato dal singolo MAC-ID, e così stimare la percentuale di svolta da inserire nella matrice O/D completa dei MAC-ID.

Se si installassero 7 dispositivi bluetooth, uno in ciascuna arteria che caratterizza in entrata/uscita il nodo di porta Maggiore, come da immagine seguente, si riuscirebbe a derivare la matrice suddetta. Inoltre i dispositivi BT potrebbero essere utilizzati per avere indicazione dei tempi di viaggio tra le diverse coppie O/D nel nodo di Porta Maggiore, dopo un opportuna operazione di filtraggio dei dati rilevati.



*figura 129 nodo di Porta Maggiore, posizione indicativa dei dispositivi Bluetooth*

I dispositivi avrebbero un raggio di rilevamento di 30-40m, per ridurre l'area di rilevazione al segmento stradale, escludendo quindi le intersezioni limitrofe o altri elementi di disturbo. Nelle seguenti immagini è indicata l'ideale distanza dei dispositivi dal nodo.



figura 130 Via Prenestina, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth



figura 131 Via Statilia, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth



figura 132 Via di Porta Maggiore, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth



*figura 133 Via Giolitti, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth*



*figura 134 Via dello Scalo San Lorenzo, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth*



figura 135 Via Casilina, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth



figura 136 Via Eleniana, posizione indicativa del dispositivo Bluetooth

### 10.10.1 Funzionamento integrato

Le telecamere avrebbero la funzione di rilevare il flusso di traffico presso 4 delle sezioni di entrata al nodo. Via Prenestina è attualmente dotata di una spira virtuale, pertanto non sarebbe necessaria una quinta telecamera. In questo modo sono forniti conteggi dettagliati per i veicoli entranti nel nodo. La posizione delle aree di rilevamento rimarrebbe configurabile a piacere a seconda degli obiettivi da perseguire in future analisi (rilevamento mobilità debole, conteggio, categorizzazione dei veicoli). Nella seguente planimetria è riportata la posizione ideale delle sezioni di misura per conteggiare i veicoli in ingresso al nodo, con la posizione delle relative telecamere (mantenute nella loro posizione attuale). La quarta telecamera (4), sarebbe utile per rilevare i veicoli entranti da Via Eleniana, essendo presente un ostacolo alla visibilità dalla telecamera 2 e dalla 3 (monumento storico).



figura 137 posizione dei dispositivi e delle sezioni di rilevamento

Misurando il numero di MAC-ID univoci registrati in entrata nelle cinque arterie, associandoli con le successive rilevazioni per le uscite, è possibile ottenere una matrice O/D dei MAC-ID. Gli algoritmi di riconoscimento sono da progettare, ma in linea teorica il funzionamento sarebbe il seguente: a posteriori, con un ritardo di X minuti, per ciascun dispositivo bluetooth si imposterebbe una ricerca nei dati ricevuti. Ogni MAC-ID andrebbe ricercato negli altri 7 dispositivi: il Timestamp più vecchio indica il BT di origine. Questo procedimento andrebbe effettuato con un “rolling horizon”, quindi aggiornato ogni Y minuti ( $Y \leq X$ ), per non lasciare dati in alcune finestre temporali non processati. Nelle sezioni di conteggio, si ottengono invece i flussi complessivi in ingresso in veicoli/ora. Le due informazioni sono complementari e fornirebbero la matrice O/D dei flussi Origine/Destinazione per il nodo. Nel seguente paragrafo è riportato un esempio.

### 10.10.2 Esempio di funzionamento

Questo esempio è una simulazione del procedimento di costruzione della matrice O/D. Considerate le rilevazioni dei MAC-ID che per la prima volta sono stati osservati in Via Prenestina, gli stessi ID saranno stati rilevati successivamente in una delle sei uscite (si esclude l’uscita in Via Prenestina per semplicità, escludendo che origine e destinazione coincidano). Nella figura è riportato uno schema

con il numero (fittizio) di rilevazioni di MAC-ID, ed il vettore che rappresenta il movimento Origine-Destinazione individuato.

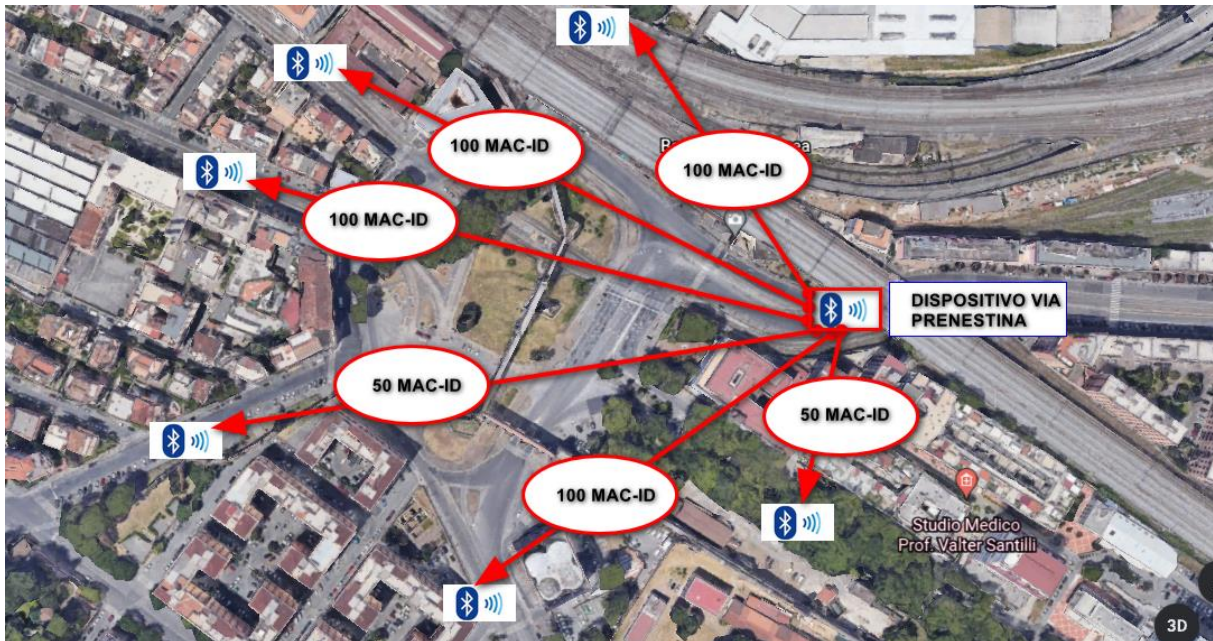


figura 138 schema esempio di origini-destinazioni tra MAC-ID rilevati

Da questi, si potrebbe derivare la riga della matrice O/D dei MAC-ID che ha come Origine Via Prenestina. Non essendo determinabile con certezza se il numero di MAC-ID corrisponde al numero di veicoli, per possibili errori di conteggio, dispositivi bluetooth appartenenti ad altre categorie (pedoni) o altri elementi di disturbo, i valori nella matrice sono relativi, ovvero in percentuale. In tal modo i MAC-ID vengono utilizzati come campione per determinare la percentuale di svolta del reale flusso misurato, come descritto in seguito.

O\D	Via Prenestina	Via S. San Lorenzo	Via Giolitti	Via P. Maggiore	Via Statilia	Via Eleniana	Via Casilina
Via Casilina							
Via Prenestina	0,00%	20,00%	20,00%	20,00%	10,00%	20,00%	10,00%
Via Scalo San Lorenzo							
Via di Porta Maggiore							
Via Eleniana							

figura 139 matrice O/D per O:Via Prenestina

Allo stesso modo vengono completate le restanti celle, prendendo una ad una in considerazione le vie di origine.

La matrice O/D dei MAC-ID in percentuale risulterebbe:

O\D	Via Prenestina	Via S. San Lorenzo	Via Giolitti	Via P. Maggiore	Via Statilia	Via Eleniana	Via Casilina
Via Casilina	10,00%	20,00%	10,00%	30,00%	10,00%	20,00%	0,00%
Via Prenestina	0,00%	20,00%	20,00%	20,00%	10,00%	20,00%	10,00%
Via Scalo San Lorenzo	30,00%	0,00%	10,00%	10,00%	10,00%	20,00%	20,00%
Via di Porta Maggiore	10,00%	20,00%	10,00%	30,00%	10,00%	10,00%	10,00%
Via Eleniana	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	10,00%	0,00%	10,00%

figura 140 matrice O/D derivata dai MAC-ID (bluetooth)

Le percentuali inserite sono le % relative al totale di MAC\_ID rilevati nella via di Origine.

Le sezioni dove le telecamere rilevano il flusso hanno quindi la funzione di fornire il reale dato di flusso in veicoli/ora. Infatti, misurando le sezioni presso le vie di accesso, le percentuali determinate per i MAC-ID possono essere utilizzate per determinare in modo proporzionale le percentuali di svolta in veicoli ora.

Ipotizzando i seguenti valori rilevati:

Sezioni di misura	Via di Accesso	Flussi misurati (veh/h)
telecamera 10/11 (2)	Via di P. Maggiore	500
telecamera 10/12 (3)	Via Casilina	1000
telecamera 10/13 (1)	Via S. San Lorenzo	1000
telecamera 10/14 (4)	Via Eleniana	1000
Spira SV1	Via Prenestina	1000

figura 141 esempio di flussi rilevati

La matrice O/D dei flussi diverrebbe:

O\D	Via Prenestina	Via S. San Lorenzo	Via Giolitti	Via P. Maggiore	Via Statilia	Via Eleniana	Via Casilina
Via Casilina	100	200	100	300	100	200	0
Via Prenestina	0	200	200	200	100	200	100
Via Scalo San Lorenzo	300	0	100	100	100	200	200
Via di Porta Maggiore	50	100	50	150	50	50	50
Via Eleniana	200	200	200	200	100	0	100

figura 142 esempio di matrice O/D dei flussi rilevati

## 11 Dashboards

A completamento del nuovo sistema di monitoraggio, sarebbero configurabili le seguenti dashboard. Questi pannelli di controllo risulterebbero infatti utili per la gestione dei dispositivi e per una immediata osservazione dei dati.

Le seguenti dashboard sono state progettate a partire da altri progetti di Swarco srl, con l'unico scopo di fornire un esempio per la proposta presente. Lingua del testo, colore, filtri e altre impostazioni rimangono modificabili a piacere.

Le dashboard complementari al sistema di monitoraggio proposto, sviluppate con il software Tableau, sono:

- Una dashboard per il monitoraggio dello status degli strumenti di conteggio:



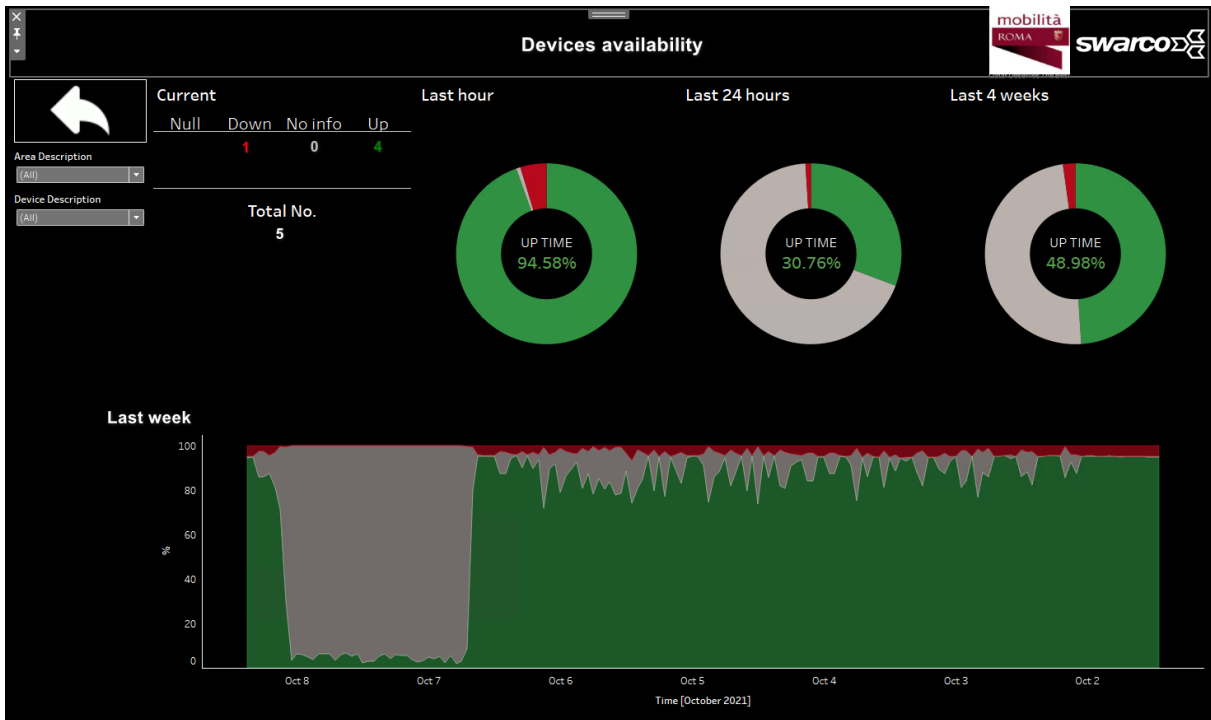


figura 143 dashboard 1: status dei dispositivi di conteggio

- Una vista sui conteggi, con le categorie di veicoli rilevati, per le telecamere:

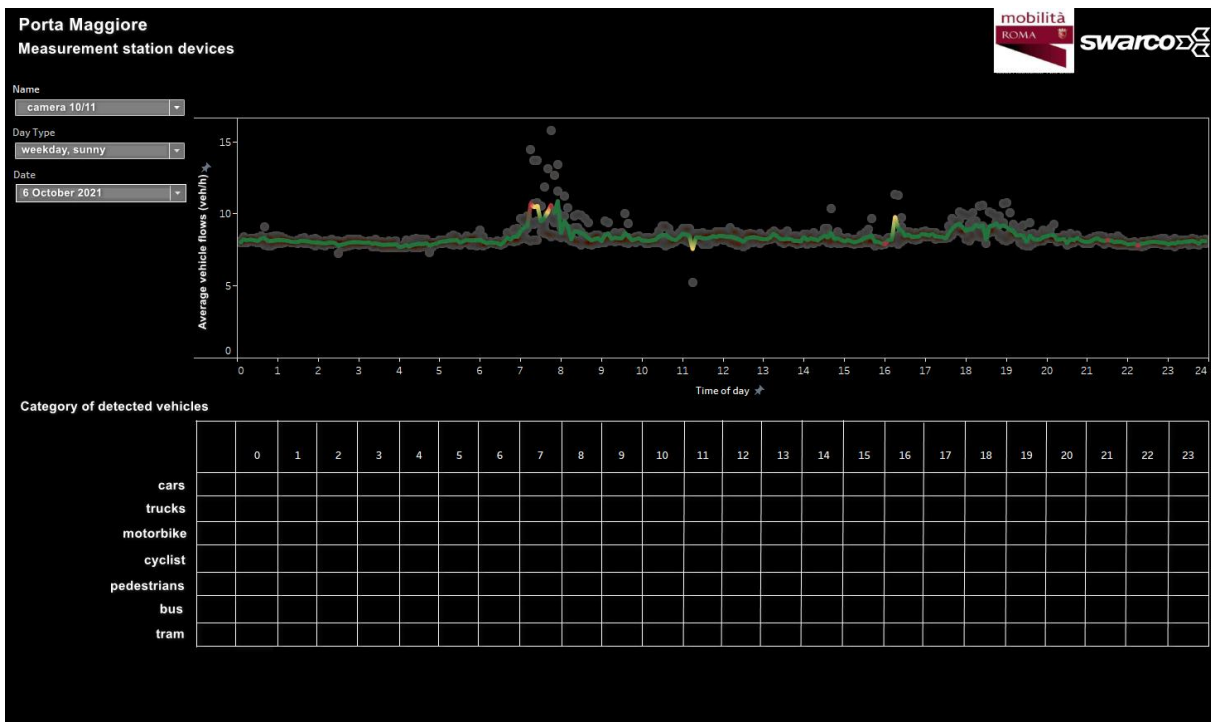


figura 144 dashboard 2: conteggio e categorizzazione, per ciascun dispositivo di rilevamento veicoli

- Una dashboard per il monitoraggio dello status e dei MAC-ID rilevati per i BT.

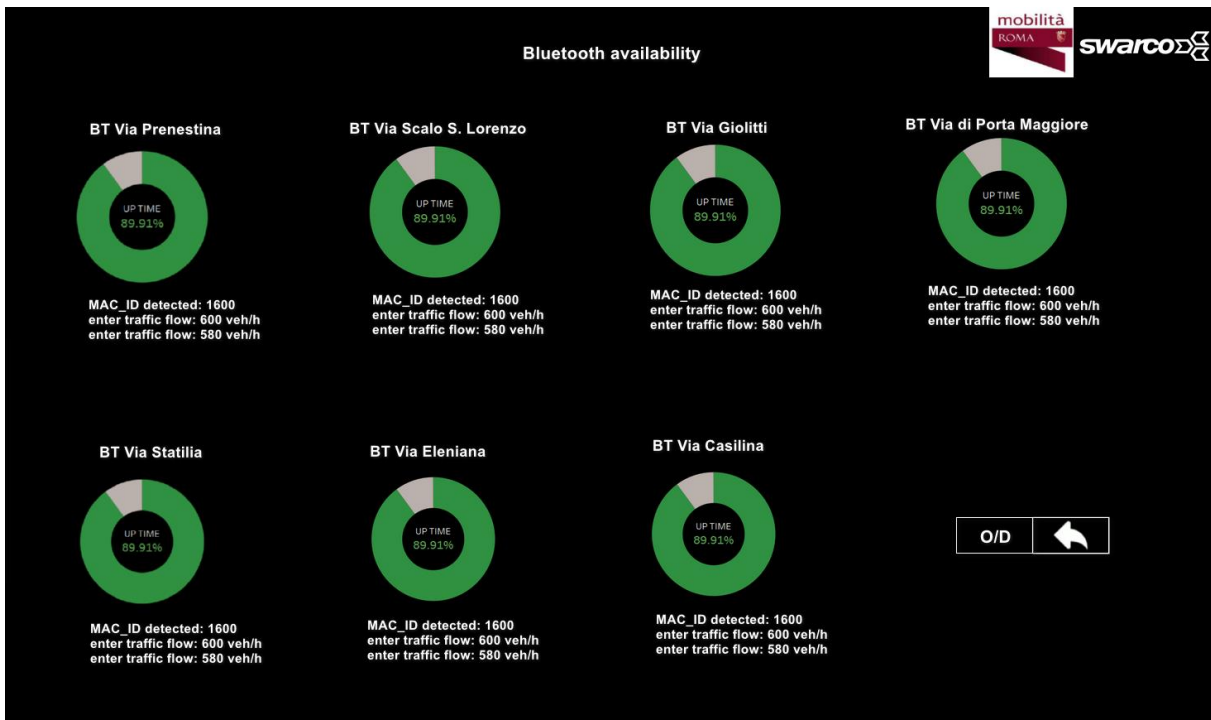


figura 145 dashboard 3: status dei bluetooth e dati rilevati

- Una dashboard connessa a quella dei BT e degli strumenti di conteggio dove visualizzare le matrici O/D:

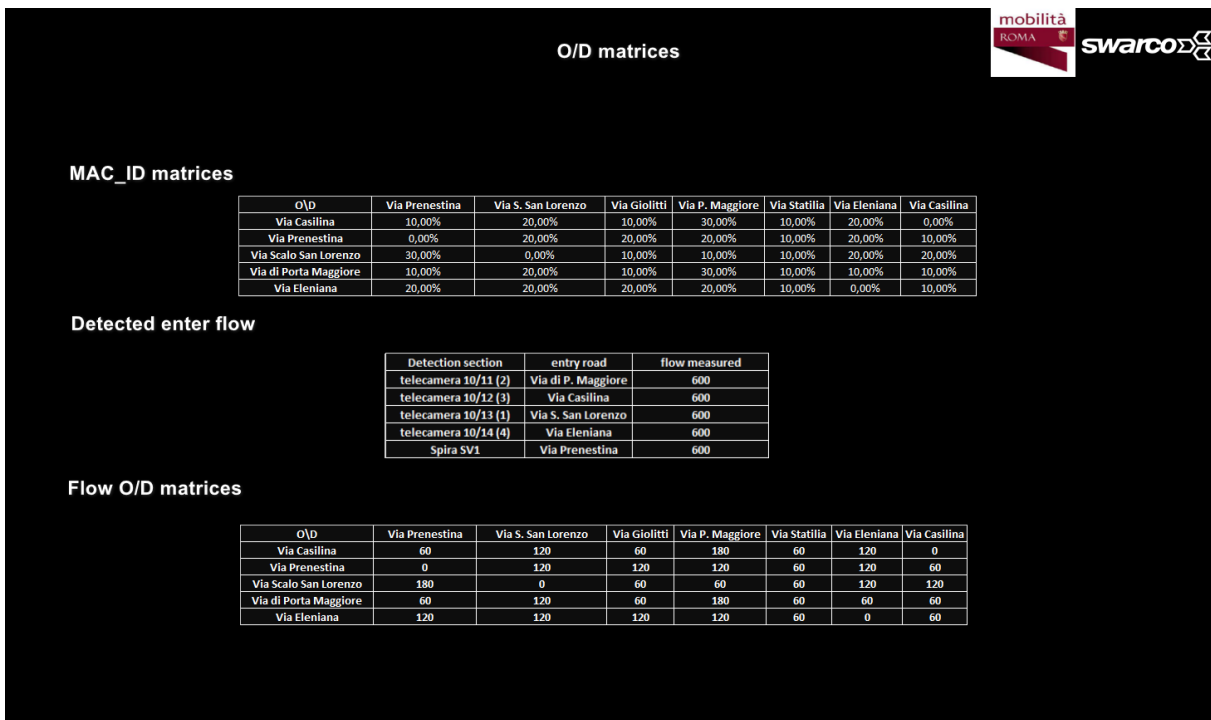


figura 146 dashboard 4: matrici ottenute

